

DOCUMENTO

Iniciativa para una Biosfera Sustentable: Una agenda de investigación ecológica

The Sustainable Biosphere Initiative: an ecological research agenda
Un Informe de la Sociedad Ecológica de América^{1,2,3}

JANE LUBCHENCO, ANNETTE M. OLSON, LINDA B. BRUBAKER,
STEPHEN R. CARPENTER, MARJOIRE M. HOLLAND, STEPHEN P. HUBBEL,
SIMON A. LEVIN, JAMES A. MacMAHON, PAMELA A. MATSON,
JERRY M. MELILLO, HAROLD A. MOONEY, CHARLES H. PETERSON,
H. RONALD PULLIAM, LESLIE A. REAL, PHILIP J. REGAL y PAUL G. RISSER

PREFACIO

Este prefacio introduce un documento de alcances y objetivos sin precedentes. En agosto de 1988 la Sociedad Ecológica de América (ESA) inició un esfuerzo para definir las prioridades de investigación en ecología para la última década del siglo 20. Este esfuerzo fue motivado por numerosos factores independientes. Primero, en el interior de las academias científicas, de las antecelas de gobiernos y de las instituciones que financian la investigación se ha hecho cada vez más evidente que los científicos deben ordenar sus prioridades y hacer un juicio riguroso, en relación a los rumbos de investigación que tengan la mejor expectativa, para el avance de nuestro conocimiento fundamental y para el mejoramiento de la condición humana. En respuesta a esta necesidad, Frank Press,

presidente de la Academia Nacional de Ciencias, desafió a todos los científicos a definir sus prioridades. Los recursos financieros son limitados. Las demandas nacionales en competencia van desde la seguridad nacional hasta el servicio social y existen numerosas prioridades importantes que requieren atención y financiamiento. Como consecuencia de lo anterior no es posible financiar toda la investigación científica. Si nosotros los científicos no somos capaces de establecer nuestras propias prioridades, otros lo harán por nosotros.

Segundo, la necesidad de atenuar el rápido deterioro del medio ambiente y de aumentar su capacidad para satisfacer las necesidades de la población mundial ha pasado a ser de primera importancia. Requeriremos cada vez de más conocimiento ecológico para utilizar y mantener los recursos de la Tierra. Aunque las necesidades de nuevo conocimiento y de aplicación del existente van en aumento, los medios para lograr dichos objetivos han disminuido debido a la limitación de los fondos disponibles. Deben tomarse decisiones difíciles en relación con lo que se debe o no se debe financiar.

Con este telón de fondo es necesario aclarar que la investigación básica es el cimiento sobre el cual deben basarse las decisiones ambientales fundamentadas: mientras mayores sean las necesidades aplicadas, más importante se hace la investigación básica. Si este punto no es entendido claramente, aplicaciones hechas con criterio estrecho recibirán prioridad. A menos

¹ Los autores listados se desempeñaron como miembros del Comité para una Agenda de Investigación para los años 90, de la Sociedad Ecológica de América. La afiliación institucional de los mismos se encuentra en la página 218.

² Dirección para solicitud de apartados: The Ecological Society of America, Public Affairs Office, 9650 Rockville Pike, Suite 2503, Bethesda, Maryland 20814, USA.

³ La traducción del documento original (*Ecology* 72(2): 371-412, 1991) fue realizada con el auspicio de la Sociedad Ecológica de América por E. Rho y bajo responsabilidad técnica de J.C. Castilla, Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 114-D, Santiago, Chile. S. Navarrete y J. Lubchenco, Dept. Zoology, Oregon State University, Corvallis, USA, revisaron el borrador final y sugirieron modificaciones importantes.

que la ciencia de la ecología aplicada se base en fundamentos sólidos, cualquier intento de manejo ambiental está destinado al fracaso. Los mayores avances en el conocimiento ecológico han provenido de la fertilidad creativa de investigadores que han desarrollado investigación básica motivados por curiosidad intelectual. Es crítico examinar como alimentar mejor el desarrollo de esta subestructura básica y entrenar los ecólogos del mañana.

El dilema del aumento de las necesidades en presencia de una disminución de los medios y el desafío de identificar las prioridades, establecen el escenario para que la Sociedad Ecológica de América conduzca a sus miembros hacia un período de introspección, en el cual será examinado el completo universo de actividades ecológicas. Este estudio es la pieza central de este análisis. Identifica aquellos esfuerzos considerados más urgentes tanto en términos de proveer avances en el campo de la ecología como por su potencial para mejorar la condición humana.

Con el fin de llevar a cabo esta monumental tarea, uno de nosotros (HAM) estableció un comité de amplia representación, bajo el liderazgo de Jane Lubchenco, entonces vicepresidente y actualmente segundo presidente-electo. Este comité, compuesto por ecólogos que representan una amplia gama de subdisciplinas ecológicas, se reunió intensivamente a lo largo de un período de más de un año. Ellos emprendieron la tarea de identificar las áreas de investigación ecológica más excitantes y relevantes y someter sus conclusiones a la evaluación crítica de miembros de la Sociedad y de otros grupos interesados. Sus esfuerzos incluyeron consideraciones respecto a las prioridades de investigación, necesidades de educación y avance y estrategias para implementar las recomendaciones.

El proceso de revisión y corrección ha sido uno de los más exhaustivos que haya recibido un documento. Aunque este esfuerzo ha sido dirigido por el comité, el documento mismo representa, en realidad, la contribución de toda la Sociedad Ecológica de América como asimismo de una comunidad más amplia. Desde el comienzo

y a lo largo de todo el proceso se hicieron llamados, tanto de contribuciones al documento como al proceso mismo, por medio del Boletín de la Sociedad, del Noticiero de la Oficina de Relaciones Públicas y a través de talleres y seminarios. Estos llamados dieron como resultado el compromiso de una gran cantidad de personas y la incorporación de sus ideas. En agosto de 1990 se presentó un borrador del documento a cerca de mil miembros asistentes a la reunión anual de la Sociedad. Hubo un amplio apoyo a su sentido y estructura. Las preguntas provenientes de la asamblea aportaron contribuciones adicionales, al igual que el taller que se realizó a continuación, el cual también contó con la asistencia de gran cantidad de miembros de la Sociedad. Después de la reunión anual se recibieron más de 150 cartas de miembros con sugerencias adicionales. Estas nuevas contribuciones fueron incorporadas por el comité en el documento que se entrega a continuación. Aunque algunos miembros de la Sociedad indudablemente no estarán de acuerdo con cada detalle de este informe, la revisión y corrección interactivas han producido un documento que es un esfuerzo comunitario y del cual podemos estar todos orgullosos. El Comité Ejecutivo de la ESA ha patrocinado este informe con entusiasmo. No debemos descansar por mucho tiempo en el éxito logrado. Nos enfrentamos al desafío de hacer de la agenda aquí delineada una realidad y de incluir como socios de esta osada empresa a nuestros colegas internacionales y a aquellos de disciplinas afines, con el fin de proveer a los científicos con las bases para una biosfera sustentable.

El comité se complace en agradecer a la Andrew W. Mellon Foundation, a la Ecological Society of America y Oregon State University por su apoyo en el desarrollo conceptual de la Iniciativa para una Biosfera Sustentable (SBI). A la Andrew W. Mellon Foundation, la National Science Foundation, U.S., la Environmental Protection Agency, U.S., la National Aeronautic and Space Administration, U.S. y al Department of Energy, U.S., agradecemos el financiamiento de los costos de

publicación. Nosotros (HAM y SAL), estamos muy agradecidos del liderazgo y gestión de Jane Lubchenco y de los notables esfuerzos del comité.

H.A. MOONEY
Presidente 1988-1989
Sociedad Ecológica de América

y
SIMON A. LEVIN
Presidente 1990-1991
Sociedad Ecológica de América

RESUMEN

En este documento la Sociedad Ecológica de América propone la Iniciativa para una Biosfera Sustentable (SBI), una iniciativa que se centra en el rol necesario de la ecología en el manejo racional de los recursos de la Tierra y en la mantención de los sistemas de la Tierra que sustentan la vida. Este documento pretende ser un llamado para todos los ecólogos, pero también servirá como medio de comunicación con individuos de otras disciplinas con los cuales los ecólogos deben aunar esfuerzos para abordar nuestro predicamento común.

Muchas de las problemáticas ambientales que desafían a la sociedad humana son fundamentalmente de naturaleza ecológica. El crecimiento de la población humana y su creciente uso y mal uso de recursos están ejerciendo una presión tremenda sobre la capacidad de la Tierra para sustentar la vida. La humanidad debe desarrollar ahora el conocimiento necesario para la conservación y manejo sensato de los recursos de la Tierra. Los ciudadanos, diseñadores de políticas, administradores de recursos y líderes de empresas e industrias necesitan tomar decisiones respecto a los recursos de la Tierra, pero dichas decisiones no pueden ser tomadas efectivamente si no se tiene una comprensión fundamental de los mecanismos mediante los cuales las actividades humanas afectan a los sistemas naturales de la Tierra. La investigación básica—gestada por investigadores y sujeta a un sistema de revisión de pares— es el fundamento sobre el cual deben basarse las decisiones ambientales bien dirigidas. El

conocimiento y la comprensión ecológicos son necesarios para: detectar y observar cambios, evaluar las consecuencias de una amplia gama de actividades humanas y planificar el manejo de sistemas ecológicos sustentables, naturales o dominados por el hombre.

En respuesta a dichas necesidades nacionales e internacionales, la Sociedad Ecológica de América ha desarrollado la Iniciativa para una Biosfera Sustentable (SBI), un marco para la adquisición, disseminación y utilización del conocimiento que respalda los esfuerzos destinados a asegurar la sustentabilidad de la biosfera. La SBI llama a: (1) el desarrollo de investigación básica para la adquisición de conocimiento ecológico; (2) la comunicación de dicho conocimiento a los ciudadanos, y (3) la incorporación de dicho conocimiento en las decisiones de política y manejo.

PRIORIDADES DE INVESTIGACION

En primer lugar, este documento se centra en la adquisición de conocimiento ecológico. Identifica los programas de investigación ecológica de la más alta prioridad y recomienda los pasos necesarios para el logro de los objetivos de investigación. Además, este documento establece la base para mejorar la comunicación y la aplicación del conocimiento ecológico.

Los criterios empleados para evaluar las prioridades de investigación fueron: (1) el potencial para contribuir al conocimiento ecológico fundamental y (2) el potencial para responder a las más importantes preocupaciones del hombre en relación con la sustentabilidad de la biosfera. En base a dichos criterios la SBI propone tres Prioridades de Investigación:

- * *Cambio Global*, incluyendo las causas y consecuencias ecológicas de cambios en el clima, de la química de la atmósfera, del suelo y del agua (incluyendo contaminantes) y de los patrones de uso del suelo y agua.
- * *Diversidad Biológica*, incluyendo: cambios naturales y antropogénicos de los

patrones de diversidad genética, de especies y de hábitat; los determinantes ecológicos y las consecuencias de la diversidad; la conservación de especies raras y en declinación, y los efectos que causan los cambios globales y regionales en la diversidad biológica.

- * *Sistemas Ecológicos Sustentables*, incluyendo la definición y detección de agentes de estrés en sistemas ecológicos naturales y manejados, la restauración de sistemas dañados, el manejo de sistemas ecológicos sustentables, el papel que desempeñan plagas, patógenos y enfermedades y la interfase entre procesos ecológicos y sistemas sociales humanos.

RECOMENDACIONES DE INVESTIGACION

Cada una de dichas prioridades de investigación requiere un tipo de acción diferente. Las iniciativas que existen a nivel nacional e internacional están dirigidas a aspectos de las dos primeras prioridades. Sin embargo, el éxito de estos programas requerirá de un énfasis creciente en tópicos ecológicos claves.

- * *Recomendación de investigación No 1:* Debe dedicarse mayor atención al examen de los mecanismos a través de los cuales la complejidad ecológica controla los procesos globales.

En el tópico del Cambio Global no se ha prestado suficiente atención a los mecanismos mediante los cuales la complejidad ecológica controla los procesos globales. Aspectos claves que influyen en el comportamiento de la biosfera en el sistema terrestre son: la diversidad de especies y hábitats, los patrones de distribución de ensamblajes ecológicos y las diferencias en la capacidad productiva y de almacenamiento de diferentes tipos de ecosistemas.

- * *Recomendación de investigación No 2:* Los nuevos esfuerzos de investigación deben abordar tanto la importancia que tiene la diversidad ecológica en el control de procesos ecológicos como

el rol que juegan los procesos ecológicos en la configuración de patrones de diversidad a distintas escalas de tiempo y espacio.

Gran parte del esfuerzo actual, en el tópico de diversidad biológica, está dedicado a la enumeración de especies en variados hábitats y a la preservación de sitios bióticamente importantes. Estos importantes esfuerzos establecen la base para la investigación aquí propuesta y deben continuar, pero también deben ser considerados otros dos tópicos de vital importancia. Primero, será necesario establecer en qué medida los patrones de diversidad biológica son importantes en la determinación del comportamiento de sistemas ecológicos (e.g., respuestas a cambios climáticos, tasas de flujo de nutrientes, o respuestas a contaminantes). Sólo cuando se conozcan estas relaciones será posible desarrollar estrategias de manejo para la mantención de sistemas ecológicos naturales o dominados por el hombre. Segundo, será necesario entender cómo interactúan los procesos ecológicos con factores físicos y químicos para determinar o controlar la diversidad biológica. Ello requerirá investigar cómo las especies individuales interactúan y son modificadas por el ambiente abiótico, a escalas de tiempo ecológica y evolutiva.

- * *Recomendación de investigación No 3:* Debería establecerse un nuevo y amplio programa integrado de investigación sobre la sustentabilidad de los sistemas ecológicos. Este programa debería enfocarse hacia la comprensión de los procesos ecológicos fundamentales de los sistemas naturales o de aquellos dominados por el hombre, con el fin de definir estrategias de restauración y manejo que lleven a un aumento de la sustentabilidad de los sistemas ecológicos de la Tierra.

La planificación de programas amplios e integrados en áreas del Cambio Global y de la diversidad biológica está más avanzada que aquella relacionada con sistemas ecológicos sustentables. Existen programas de investigación destinados al desarrollo susten-

table de recursos naturales específicos (e.g., silvicultura o agricultura sustentables). Sin embargo, los actuales esfuerzos de investigación son inadecuados para tratar con sistemas sustentables de múltiples recursos, múltiples ecosistemas y grandes escalas espaciales. Más aún, gran parte de la investigación actual está enfocada a sistemas manejados basados en bienes de consumo de primera necesidad, prestando poca atención a la sustentabilidad de sistemas naturales cuyos productos y servicios actualmente carecen de valor en el mercado. Abordar el tópico de sistemas ecológicos sustentables requerirá de la integración de las ciencias sociales, físicas y biológicas.

IMPLEMENTACION

La implementación exitosa de la SBI requerirá de un aumento significativo de la interacción interdisciplinaria que vincule a los ecólogos con toda la comunidad científica, con los medios de comunicación masiva y organizaciones educacionales y con los diseñadores de políticas y administradores de recursos de todos los sectores de la sociedad. Este documento recomienda acciones específicas que pongan en marcha el desarrollo de dichos vínculos e inicien los primeros pasos de la SBI. Las acciones que se indican a continuación serán iniciadas por la Sociedad Ecológica de América, pero requerirán del amplio apoyo y participación de otros grupos e individuos que abarquen, desde agencias federales y estatales de financiamiento y otras sociedades científicas, a diseñadores de políticas, líderes de empresas e industrias y ciudadanos interesados.

El componente investigación de la SBI

La puesta en marcha del componente investigación de la SBI implicará tanto la coordinación con programas en curso como la iniciación de nuevos programas. Con el fin de desarrollar proyectos de acción inmediata, se propone la realización de una serie de talleres que reúnan a ecólogos con expertos de disciplinas rela-

cionadas de las ciencias naturales y sociales con administradores de recursos y diseñadores de políticas.

* *Item de acción No 1:* Durante el próximo año, un comité organizador de la Sociedad Ecológica de América planificará talleres con el objetivo de coordinar la SBI con los esfuerzos actualmente en desarrollo sobre Cambio Global e incrementar la investigación sobre el rol que juega la complejidad ecológica en los procesos globales.

* *Item de acción No 2:* Durante el próximo año un comité organizador de la Sociedad Ecológica de América planificará talleres con el objetivo de desarrollar una iniciativa en diversidad biológica enfocada hacia las causas y consecuencias ecológicas de los patrones de diversidad biológica.

* *Item de acción No 3:* Durante el próximo año un comité organizador de la Sociedad Ecológica de América planificará talleres con el objetivo de iniciar un programa amplio e integrado sobre la sustentabilidad de sistemas ecológicos, enfatizando los procesos ecológicos fundamentales que afectan la sustentabilidad de sistemas naturales o manejados.

Componente educacional de la SBI

Las condiciones ambientales que han hecho imperativa la Iniciativa para una Biosfera Sustentable también han demostrado la necesidad de educación ecológica entre los ciudadanos de hoy y del mañana. La comprensión y manejo de la biosfera requiere de información ecológica. Existen muchas estrategias que permiten abordar las necesidades de educación; por ejemplo: trabajar con medios de comunicación masiva con el fin de aumentar la conciencia pública sobre conceptos y problemáticas ecológicas; hacer del aprendizaje ecológico un objetivo de programas de estudios de pregrado; desarrollar programas de postgrado más interdisciplinarios que incluyan los tópicos necesarios para comprender la biosfera. Los ítemes de acción que se in-

cluyen a continuación son los primeros pasos tendientes a abordar dichas necesidades:

* *Item de acción No 4:* Durante el próximo año el Comité de la Agenda de Investigación de la Sociedad Ecológica de América supervisará la preparación y publicación de un documento de educación pública, no técnico, que explique la importancia que tienen la ecología y la investigación ecológica para la sociedad.

* *Item de acción No 5:* Durante el próximo año la Sección de Educación de la Sociedad Ecológica de América desarrollará, en forma sistemática, estrategias a corto y largo plazo destinadas a incrementar el conocimiento ecológico entre estudiantes y público en general.

Más aún, la Sociedad Ecológica de América debería determinar los recursos humanos necesarios para llevar a cabo la investigación ecológica propuesta por la SBI y desarrollar los mecanismos específicos para abordar las necesidades identificadas, incluyendo subsidios para entrenamiento y premios o estímulos de desarrollo profesional.

Componente de toma de decisiones ambientales de la SBI

Miles de decisiones con base ecológica son hechas anualmente por diseñadores de políticas y agencias reguladoras, planificadores del uso del suelo y agua, administradores de recursos, empresas e industrias, firmas consultoras y grupos conservacionistas. Para que la información ecológica sea útil a los que toman decisiones ésta debe ser tanto accesible como relevante a sus mandatos y responsabilidades. Por lo tanto, la aplicación del conocimiento ecológico requerirá de una mejor comunicación entre los ecólogos y los responsables de la toma de decisiones en todos los sectores de la sociedad. La experiencia que poseen las sociedades profesionales orientadas al manejo en el establecimiento de prioridades ambientales será esencial para abrir nuevos caminos de comunicación.

* *Item de acción No 6:* Durante el próximo año un comité organizador de la Sociedad Ecológica de América iniciará la exploración de mecanismos que lleven a los ecólogos a ser más sensibles a problemas ambientales críticos y a un mayor compromiso de su experiencia hacia las mismas. Este comité trabajará en estrecha relación con sociedades profesionales orientadas hacia el manejo y con administradores de recursos u otros responsables de la toma de decisiones ambientales.

Dimensiones internacionales de la SBI

El marco para esta iniciativa ha sido desarrollado en Norteamérica, pero las prioridades de investigación y las problemáticas ambientales asociadas a ella tienen importancia a nivel mundial.

* *Item de acción No 7:* Durante el próximo año la Sociedad Ecológica de América organizará una reunión de ecólogos líderes, de numerosas naciones del mundo, con el fin de evaluar la SBI e iniciar el establecimiento de un marco operacional para la cooperación internacional.

Al mismo tiempo se harán esfuerzos para interactuar con organizaciones internacionales gubernamentales (e.g., UNESCO) o no-gubernamentales (e.g., Consejo Internacional de Uniones Científicas, ICSU) que poseen programas estrechamente relacionados con el programa de investigación de la SBI.

Financiamiento de la SBI

La satisfacción de las necesidades financieras de la SBI requerirá de un aumento significativo de fondos provenientes tanto de fuentes públicas como privadas. Debido a la envergadura de esta Iniciativa se requerirá de enfoques creativos para el financiamiento de la investigación. Habitualmente, las agencias públicas como la National Science Foundation (U.S.) financian investigación básica; las agencias con una misión específica financian investigación que aplica a problemas de su interés particular; las empresas financian investigación

que responde a incógnitas imperativas para la industria; y las fundaciones financian tópicos o temas de interés específico. La SBI abarca todos estos objetivos y, como resultado de ello, debe ser planificada y financiada por un rango de agencias y organizaciones.

Las estructuras administrativas actuales son insuficientes para coordinar y financiar el rango de actividades previsto para la SBI. Consecuentemente será necesario desarrollar una nueva estructura administrativa que permita que muchas agencias auspicien el programa de investigación integrado. Para el logro de la coordinación y financiamiento necesarios deben considerarse una variedad de mecanismos, incluyendo un nuevo o ya existente comité interagencias, un nuevo instituto nacional, u otro tipo de ordenamiento administrativo. Esta nueva organización daría mayor desarrollo a las prioridades de investigación de la SBI, coordinaría las estrategias de financiamiento y establecería e implementaría los procedimientos para la evaluación del progreso en investigación de la Iniciativa.

Al establecer nuevos enfoques interdisciplinarios e interorganizacionales será particularmente importante aprovechar las oportunidades de creatividad e innovación. La piedra angular de la SBI debe ser la investigación gestada por investigadores, sujeta a un sistema de revisión de pares, desarrollada por investigadores individuales o por grupos multidisciplinarios.

* *Item de acción No 8:* Durante el próximo año la Sociedad Ecológica de América iniciará discusiones con el fin de desarrollar un marco innovativo para la coordinación y financiamiento de la SBI. Se pondrá énfasis en aumentar las oportunidades de investigación gestada por investigadores, sujeta a un sistema de revisión de pares en el contexto de programas coordinados que financiarían tanto a investigadores individuales como a grupos de trabajo multidisciplinarios.

La agenda de investigación ecológica propuesta por este documento parte de la base que para resolver muchos problemas

ambientales urgentes es necesario mejorar la comprensión de principios ecológicos básicos; continúa con la identificación de tres áreas prioritarias que requieren de intensos esfuerzos de investigación, y concluye con las acciones a ser iniciadas por la Sociedad Ecológica de América con el fin de reforzar y expandir los esfuerzos de investigación en dichas áreas claves. El éxito de la Iniciativa para una Biosfera Sustentable dependerá de: (1) la voluntad de ecólogos individuales para participar en las actividades propuestas, diseminar la visión de la SBI y planificar y ejecutar fases posteriores de la misma, y (2) de la visión y habilidades de los diseñadores de políticas, administradores de agencias de financiamiento, representantes gubernamentales, líderes de empresas e industrias, y ciudadanos individuales para apoyar, amplificar y extender las acciones que hemos iniciado. En este momento ni el financiamiento ni la estructura en este país son suficientes para abordar las necesidades de investigación descritas en este documento. Más aún, para el logro de una biosfera sustentable se requiere no sólo adquirir conocimiento ecológico a través de investigación, sino que también de la comunicación de dicha información y conocimiento a todos los ciudadanos y de la incorporación de dicho conocimiento a decisiones ambientales, económicas y políticas. Aunque las barreras para la obtención de dichos objetivos son enormes, el lograr una Biosfera Sustentable es uno de los desafíos más importantes con que se enfrenta hoy la humanidad. El factor tiempo es esencial. Las nuevas tecnologías, la amplia apreciación sobre la magnitud de los problemas ambientales y la creciente apreciación de la importancia que tiene la investigación ecológica básica se combinan para proveer de una oportunidad sin precedentes para hacer progresos significativos hacia la obtención de una biosfera sustentable.

I. INTRODUCCION

Los problemas ambientales resultantes de actividades humanas han comenzado a poner en peligro la sustentabilidad de los

sistemas de la Tierra sobre los que descansa la vida. Entre los desafíos más críticos con que se enfrenta la humanidad se encuentran la conservación, la restauración y el manejo prudente de los recursos de la Tierra. Los ciudadanos, diseñadores de políticas, administradores de recursos y líderes de empresas e industrias necesitan tomar decisiones bien informadas en relación a estos recursos. El conocimiento ecológico es un aspecto crítico de la información necesaria para tomar decisiones ambientales complejas. La comprensión y conocimiento ecológicos son necesidades urgentes para detectar y observar cambios ambientales, para evaluar las consecuencias de una gran gama de actividades humanas y para planificar el manejo de sistemas ecológicos sustentables. Nuevas conexiones interdisciplinarias se requerirán para llevar a cabo la investigación necesaria, educar a los científicos y al público en general y asegurar que el singular ámbito de conocimiento de la ciencia ecológica sea accesible para los que toman decisiones ambientales en todos los sectores de la sociedad. En respuesta a estas necesidades nacionales e internacionales la Sociedad Ecológica de América propone la Iniciativa para una Biosfera Sustentable (SBI), un marco para la adquisición, disseminación y utilización del conocimiento ecológico para asegurar la sustentabilidad de la biosfera. En este documento nosotros definimos el alcance de dicha iniciativa y desarrollamos una exposición razonada de la misma.

Muchos de los problemas ambientales que desafían a la sociedad humana son de naturaleza fundamentalmente ecológica. La población humana alcanza ahora 5,2 billones y aumenta a una velocidad de 1,8% cada año. El aumento de esta población y su creciente uso de recursos están ejerciendo una enorme presión sobre los sistemas ecológicos de la Tierra. Como resultado de lo anterior, los sistemas de la Tierra que sustentan la vida están cambiando del mismo modo que sus habilidades para mantener a la sociedad humana se están degradando rápidamente. La sostenida capacidad productiva de la Tierra está en riesgo y ello se evidencia en: las

crecientes dificultades para el manejo de desechos sólidos y tóxicos; la rápida velocidad de deforestación y destrucción de cuencas hídricas a través del mundo; la alta velocidad de extinción de especies causada por actividades humanas; y en cambios en la atmósfera tales como el aumento de los gases trazas troposféricos y el agotamiento del ozono estratosférico. Muchos problemas ambientales, en particular aquellos que involucran hambre, enfermedades y uso sostenido de recursos, implican tanto patrones de asignación de recursos como de disponibilidad total de los mismos. A medida que la población del mundo se expande, que las demandas de redistribución de recursos escasos continúan y que el estándar de vida de los países en desarrollo cambia, los efectos de las actividades humanas sobre los recursos de la Tierra aumentarán a velocidades aún mayores.

La comprensión ecológica de fenómenos complejos se hace esencial para la sociedad si ésta desea anticipar o amortiguar los efectos ambientales derivados de la actividad humana. Las actividades humanas pueden tener efectos no previstos o indirectos en algunos de los sistemas de la Tierra que sustentan la vida, ello a menudo acontece en sitios que se encuentran a considerable distancia de los puntos de actividad. Por ejemplo, la deforestación tropical puede afectar el clima mundial a través de la alteración del balance global de carbono. La introducción de la agricultura de irrigación puede afectar la productividad de pesquerías marinas a través de la alteración de la calidad del agua y de los regímenes de flujo debido a la construcción de diques. En estos casos, la investigación ecológica puede descubrir las conexiones entre poblaciones, comunidades y ecosistemas y entre los dominios abiótico y biótico. El establecimiento de conexiones interdisciplinarias facilitará el avance de la comprensión ecológica y ayudará a hacer el conocimiento ecológico más accesible al público y a los responsables de la toma de decisiones ambientales (Fig. 1). Los avances en las ciencias físicas, químicas, biológicas o sociales son interdependientes. Así como los descubrimientos

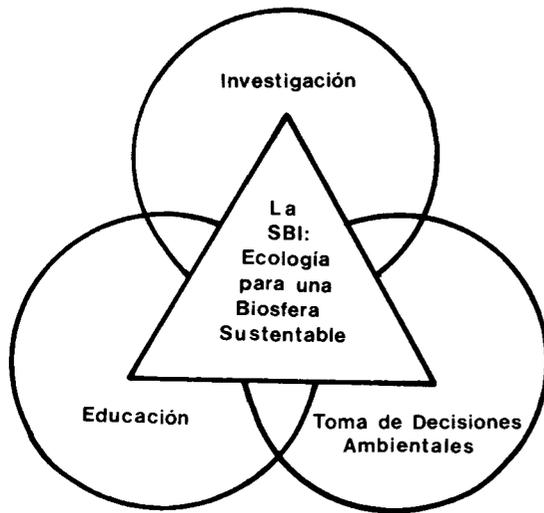


Fig. 1: Interacciones interdisciplinarias requeridas por la Iniciativa para una Biosfera Sustentable (SBI).

fundamentales en ecología pueden depender de datos o técnicas derivadas de otras disciplinas científicas, la información sobre el rol que cumplen los procesos ecológicos en el ambiente químico o físico, o en sistemas sociales, puede contribuir al avance en otros campos. Sin embargo, la adquisición de conocimiento ecológico nuevo puede ser insuficiente para abordar los problemas ambientales de la Tierra a menos que dicha información pueda ser diseminada y utilizada. Además de mejorar los programas para la enseñanza de la ecología en el contexto educacional tradicional, una creciente interacción entre ecólogos y la prensa es necesaria para mejorar la conciencia pública y la comprensión de enfoques y principios ecológicos. Más aún, deben facilitarse las interacciones con los responsables de tomas de decisiones ambientales de las esferas pública, privada y sin fines de lucro. Se requiere de un foro para la discusión de la información ecológica que es más crítica para resolver problemas ambientales específicos y para definir la mejor estrategia de diseminación de la información ecológica hacia los responsables de la toma de decisiones.

En el campo de la ecología, la SBI hace un llamado al avance en la investigación, al mejoramiento de la educación y a in-

crementar la aplicación de conocimiento ecológico fundamental en la toma de decisiones ambientales (Fig. 2). Este documento se enfoca principalmente en el componente investigación de la SBI. En él identificamos los programas de investigación ecológica de mayor prioridad y recomendamos los pasos requeridos para el logro de los objetivos de investigación. Los componentes educacionales y de toma de decisiones ambientales de la SBI requieren de mayor desarrollo para identificar necesidades, establecer prioridades y hacer recomendaciones para la comunicación y aplicación del conocimiento ecológico.



Fig. 2: Componentes de la Iniciativa para una Biosfera Sustentable: la adquisición, comunicación y utilización del conocimiento ecológico.

Iniciativa para una biosfera sustentable

El componente de investigación de la SBI es el foco principal de este documento. Los criterios utilizados para evaluar las prioridades de investigación fueron: (1) el potencial para contribuir al conocimiento ecológico fundamental, y (2) el potencial para responder a las mayores inquietudes humanas respecto a la sustentabilidad de la biosfera (Fig. 3).

Basados en estos criterios, la SBI propone tres Prioridades de Investigación:



Fig. 3: Relaciones entre las secciones de este documento. Las fronteras intelectuales y los problemas ambientales son el doble criterio utilizado para establecer las prioridades de investigación. Los componentes esenciales de investigación, en las áreas prioritarias, han recibido una atención insuficiente. Estos componentes claves forman la base de las recomendaciones de investigación. La implementación de las recomendaciones requerirá de acciones específicas por parte de la Sociedad Ecológica de América y de otras instituciones de apoyo (Sección VI).

* *Cambio Global*, incluyendo las causas y consecuencias ecológicas de cambios de clima, de la química de la atmósfera, del suelo y del agua (incluyendo contaminantes) y de los patrones de uso del suelo y agua.

* *Diversidad Biológica*, incluyendo los cambios naturales y antropogénicos en los patrones de diversidad genética, diversidad de especies y diversidad de hábitat; las determinantes ecológicas y

las consecuencias de la diversidad; la conservación de especies raras y en declinación, y los efectos que causan los cambios globales y regionales en la diversidad biológica.

* *Sistemas Ecológicos Sustentables*, incluyendo la definición y detección de agentes de estrés en sistemas ecológicos naturales y manejados; la restauración de sistemas dañados; el manejo de sistemas ecológicos sustentables; el papel que desempeñan pestes, patógenos y enfermedades; y la interfase entre procesos ecológicos y sistemas sociales humanos.

La última de estas tres prioridades —la sustentabilidad de los sistemas ecológicos— es uno de los mayores desafíos con que se enfrenta la sociedad humana; sin embargo, es el que ha recibido menor atención hasta ahora. Nosotros respaldamos fuertemente los esfuerzos ya existentes para abordar las problemáticas del Cambio Global y de Diversidad Biológica. Más aún, hacemos un llamado a una gran aceleración y expansión de los esfuerzos destinados al desarrollo de sistemas ecológicos sustentables.

Aunque los ecólogos poseen conocimientos y habilidades únicos para el desarrollo de la investigación en dichos tópicos, las interacciones con otras disciplinas se hacen necesarias para lograr un enfoque verdaderamente amplio de problemas ambientales urgentes. Por ejemplo, los estudios del Cambio Global involucran muchos campos, incluyendo ecología, química y física atmosférica, oceanografía, hidrología y geología, así como también demografía humana y economía. Igualmente, para abordar problemáticas de diversidad ecológica, los ecólogos deben colaborar con taxónomos y biólogos de conservación, diseñadores de políticas, planificadores, científicos políticos y economistas. Finalmente, la sostenida utilización humana de recursos de la Tierra requerirá de nuevas alianzas entre los ecólogos y otras disciplinas, tales como: manejo de recursos, ciencias agronómicas, forestales y del suelo y otras ciencias ambientales, epidemiología y demografía, economía y planificación. La

ecología, de por sí y en muchos aspectos una ciencia interdisciplinaria, jugará un rol crítico en acelerar el desarrollo de nuevos enfoques interdisciplinarios para el estudio de estos problemas ambientales.

Una iniciativa de la magnitud que nosotros visualizamos, trascenderá los límites institucionales tradicionales e implicará nuevos e innovativos programas de colaboración. Al establecer amplios enfoques interdisciplinarios e interagencias será particularmente importante preservar las oportunidades de creatividad e innovación. Así, la piedra fundamental de la SBI deberá ser la investigación gestada por investigadores y sujeta a un sistema de revisión de pares. La SBI no es trabajo para una sola agencia; la cooperación interagencias, tal vez a través de un comité de coordinación o de un nuevo instituto, será esencial para el logro de los objetivos. Más aún, finalmente, se requerirá de la coordinación con agencias e instituciones nacionales e internacionales foráneas a los Estados Unidos.

El principal mensaje de la SBI es que para resolver problemas ambientales se requiere de nuevos avances en la comprensión de los principios ecológicos básicos. Las tres prioridades aparentemente distintas —comprensión de las consecuencias del cambio global, comprensión y conservación de la diversidad biológica, y garantizar un futuro sustentable— comparten una base ecológica común, es decir, la comprensión de la estructura, funcionamiento y capacidad de recuperación de los sistemas naturales. Este documento muestra estas conexiones e indica la investigación ecológica fundamental necesaria para abordar estas prioridades. En este documento exploramos los principios e interrogantes ecológicos a partir de los cuales se seleccionaron las prioridades, es decir, las fronteras intelectuales de la ecología (Sección II) y el conocimiento ecológico requerido para resolver problemas ambientales (Sección III). Las secciones subsiguientes destacan: las prioridades de investigación y los tópicos claves de investigación necesarios para abordar las prioridades (Sección IV); las principales recomendaciones de investigación de la SBI

(Sección V); y un plan de acción para el futuro desarrollo de la SBI (Sección VI).

II. FRONTERAS INTELECTUALES EN ECOLOGIA

Las fronteras intelectuales sirven como un punto de partida (Fig. 3) para la identificación de las prioridades de investigación. Estas fronteras están firmemente asentadas tanto en aquellos problemas ecológicos que están ligados a niveles específicos de organización biológica (Apéndice A), como en aquellos problemas que cruzan a través de dichos niveles (Apéndice B).

La ecología ha evolucionado desde una ciencia principalmente descriptiva a una que también incluye enfoques analíticos, experimentales y comparativos y emplea técnicas sofisticadas de laboratorio, terreno y percepción remota. Una parte cada vez mayor de la teoría ecológica aborda los principios que gobiernan la regulación y organización de poblaciones y comunidades en el espacio y el tiempo y a la interacción de los componentes bióticos y abióticos del medio ambiente. Nuevas herramientas que incluyen percepción remota, enfoques computacionales, análisis molecular e isotópico; modelos a escala global dan la oportunidad de descubrir nuevos fenómenos ecológicos y de estudiar fenómenos ya conocidos a escalas espaciales y temporales previamente inaccesibles. (Para un tratamiento más amplio de las nuevas oportunidades en ecología consultar National Research Council 1989c).

En esta sección presentamos una reseña de interrogantes ecológicos interesantes y excitantes, ordenadas desde aquellas con fundamento individual y evolutivo, a aquellas que implican acciones recíprocas entre los componentes bióticos y abióticos del ecosistema. En la decisión de destacar estas interrogantes de investigación se utilizaron numerosos criterios. Primero, estas interrogantes son sintéticas. Ellas implican una búsqueda de principios generales que pueden unir estudios diferentes y proveer la base para extrapolaciones y predicciones. Segundo, estas interrogantes representan

fronteras ecológicas, ya que los nuevos resultados experimentales, nuevos avances conceptuales y nuevas herramientas de investigación poseen el potencial para clarificar principios ecológicos esenciales. Aunque nosotros hemos identificado estas fronteras intelectuales basados en su potencial para hacer progresar a la ciencia ecológica, también destacamos sus obvias aplicaciones en la solución de problemas ambientales.

• *¿Cuáles son los patrones de diversidad en la naturaleza y cuáles son los factores ecológicos y evolutivos críticos que determinan estos patrones?* La comprensión de la diversidad de la naturaleza es, desde muchos puntos de vista, un problema fundamental de la investigación ecológica. Nuevas técnicas han extendido las escalas temporal y espacial sobre las cuales pueden ser detectados los patrones de diversidad. Las técnicas moleculares modernas permiten a los sistemáticos construir filogenias en base a material genético o a los biólogos analizar las características genéticas de las poblaciones existentes a escala fina. Estas técnicas abren nuevas posibilidades para describir la historia evolutiva de la diversidad y dilucidar los mecanismos que regulan la variación genética en poblaciones actuales. Las tecnologías de percepción remota están siendo usadas cada vez más para describir patrones de diversidad de gran escala a nivel de comunidades, ecosistemas y paisajes. La caracterización de patrones de diversidad es un primer paso crítico en la preservación de dicha diversidad, proveyendo así las bases de la biología de conservación. Una de las áreas más activas de investigación experimental y síntesis conceptual en ecología de comunidades es la elucidación de cómo los factores abióticos y bióticos interactúan para generar patrones de diversidad. Hay una necesidad creciente de llevar a cabo estudios teóricos y experimentales destinados a integrar las explicaciones mecanicísticas con patrones de diversidad a gran escala. La comprensión de cómo se regula la diversidad es esencial para guiar estrategias de preservación de hábitat y para la ecología de restauración.

• *¿Cómo interactúan los atributos morfológicos, fisiológicos y conductuales de los organismos?* Gran parte de la biología clásica se preocupa de las relaciones entre estructura y función. La relación entre la morfología de los organismos y la función que ellos llevan a cabo —cómo resisten el estrés físico, cómo capturan su presa o cómo atraen a la pareja— es la esencia del estudio de la naturaleza. En el campo creciente de la biomecánica, novedosas aplicaciones de principios físicos e ingenieriles y el uso de nueva tecnología han permitido avances significativos en la comprensión de los costos y beneficios funcionales de las variaciones morfológicas de los organismos. Las nuevas aplicaciones del análisis de isótopos estables en ecología vegetal tienen el potencial para relacionar procesos fisiológicos y ambientales de maneras más novedosas.

Los enfoques modernos han sido exitosos en identificar interrogantes tradicionales dentro de un marco evolutivo apropiado (e.g., Jacob 1977). El reconocimiento de la importancia de la frecuencia-dependencia ha llevado a numerosos avances recientes en la aplicación de la “teoría del juego” a problemas conductuales y evolutivos. Este tipo de perspectivas ha motivado el desarrollo de teorías más sofisticadas que combinan la sistemática, la autoecología y la biología evolutiva. La próxima década debería ser testigo de la aplicación exitosa de estos enfoques a una amplia variedad de problemas.

• *¿Cuán flexibles son la morfología, la fisiología y el comportamiento de los organismos enfrentados a estrés ambiental?* *¿Cuáles son las limitaciones proximales de los organismos?* Un problema clásico de la biología y psicología (i.e., naturaleza vs. crianza) es la comprensión de hasta qué punto el genotipo de un organismo determina su fenotipo y hasta qué grado los factores ambientales pueden modificar el fenotipo que es expresado. Uno de los primeros grandes avances conceptuales de la teoría de genética de poblaciones ha sido la separación de las fuentes de varianza entre factores genéticos y ambientales. El análisis de la plasticidad es crítico para

comprender la capacidad de los organismos para responder a cambios antropogénicos y para predecir si los cambios ambientales causarán una alteración genética dentro de poblaciones y cambios taxonómicos dentro de comunidades.

- *¿Cuáles son las determinantes y las consecuencias de la dispersión y latencia?* La dispersión y la latencia son dos de las respuestas básicas de la historia de vida de los organismos a la variabilidad ambiental. Ellas rigen la persistencia de la mayoría de las especies en una comunidad porque perturbaciones de distintos tipos crean oportunidades de colonización. Ellas también son la clave para la recuperación de ecosistemas dañados, para la diseminación de especies luego de un cambio climático y para la diseminación de especies introducidas, incluyendo organismos genéticamente manipulados.

- *¿Qué factores explican las adaptaciones de la historia de vida de los organismos? ¿Cuáles son las consecuencias de dichas adaptaciones a nivel poblacional?* La teoría de evolución de historias de vida es una de las ramas más ricas de la ecología evolutiva. Su relación con fenómenos a nivel poblacional (incluyendo estrategias reproductivas, dispersión, latencia, fenología, asignación de recursos y otros rasgos) ha sido el foco activo de investigación desde la sobresaliente publicación de Lamont Cole (Cole 1954). La “teoría del juego” y los enfoques relacionados, antes descritos, nos han entregado un nuevo juego de herramientas para abordar estos problemas. La importancia de comprender cómo las poblaciones responderán a cambios ambientales nos ha dado una nueva motivación para buscar respuestas. La teoría de historias de vida debería ser un área activa de investigación en la próxima década.

- *¿Qué factores controlan el tamaño de las poblaciones? ¿Cómo se relacionan los cambios en tamaño poblacional con los procesos que tienen lugar a nivel del individuo?* Comprender qué factores controlan la dinámica de poblaciones es una pregunta central en ecología, pregunta que además

es la médula de una amplia diversidad de problemas aplicados. Estos incluyen el manejo de poblaciones explotadas (e.g., pesquerías), la diseminación de pestes agrícolas y de enfermedades humanas, la persistencia de especies en peligro de extinción, el éxito de la introducción deliberada de organismos exóticos o genéticamente manipulados, la probable diseminación de dichas especies en forma accidental e indeseada y la ecología de restauración.

La teoría matemática de la dinámica poblacional relacionada con conductas periódicas y caóticas, conductas umbrales y equilibrios múltiples, ha sido testigo de grandes avances en los últimos 15 años. Las teorías abundan y el desafío está en unir estas teorías con datos, relacionando el desempeño individual con la dinámica poblacional. Se está desarrollando una considerable cantidad de trabajo con modelos basados en individuos, con el fin de reemplazar los clásicos enfoques fenomenológicos por modelos mecanicísticos que aportarán una base de extrapolación más allá de la experiencia histórica.

- *¿De qué manera la estructura interna de una población afecta su respuesta a distintos estreses?* La dinámica de una población es fundamentalmente afectada por su estructura interna —incluyendo edad, estado y estructura genética— y por su distribución espacial. A excepción del tratamiento explícito de la estructura genética en teoría evolutiva, las teorías clásicas de dinámica poblacional han tendido a visualizar a las poblaciones como agregados de unidades idénticas. Otros aspectos de la estructura de poblaciones han resultado ser críticos en la comprensión de la coexistencia de especies, de fluctuaciones poblacionales, de la dispersión de enfermedades y de otros fenómenos críticos. En años recientes la atención se ha volcado hacia el desarrollo de métodos para incorporar la estructura demográfica y espacial en modelos poblacionales, estableciendo el escenario para avances importantes.

- *¿De qué manera la fragmentación del paisaje afecta la dispersión y persistencia de las poblaciones?* Los patrones de pertur-

acción, naturales o inducidos por el hombre, interactúan con los atributos de las especies y con las relaciones interespecíficas para afectar los patrones de dispersión, persistencia y abundancia de las especies. La comprensión de estas influencias ha sido un problema de interés teórico fundamental durante casi medio siglo (Watt 1947). Hoy en día el estudio de los mosaicos de la tierra juega un rol clave en los esfuerzos para unir los procesos en poblaciones locales, comunidades y ecosistemas con aquellos procesos que tienen lugar a nivel de la biosfera. La utilización de la tierra por los seres humanos ha modificado los patrones de fragmentación. Puesto que la extinción de especies deseables y la dispersión de aquellas indeseables puede depender, en parte, de los patrones del paisaje, el estudio de estos problemas se ha hecho cada vez más urgente.

- *¿Qué factores rigen el ensamble de comunidades y ecosistemas y la manera cómo dichos sistemas responden a distintos agentes de estrés? ¿Qué patrones emergen de la comparación entre sistemas?* El análisis de patrones de estructura comunitaria —incluyendo la descripción de la trama trófica— es un foco central en teoría ecológica. Se han utilizado numerosas aproximaciones teóricas para desarrollar una comprensión de los factores claves que generan y mantienen esa estructura a través de un rango de escalas temporales y espaciales. Estudios de biogeografía de islas han hecho una valiosa contribución al aunar enfoques teóricos y experimentales con los procesos que gobiernan el ensamble de comunidades. Debe prestarse una creciente atención al trabajo relacionado con estas interrogantes tanto por su importancia teórica fundamental como por su relevancia en problemas de restauración y recuperación de ecosistemas después de daños de envergadura.

Estudios experimentales han investigado cómo responden determinados ecosistemas a diferentes clases de perturbaciones que van, desde la adición de nutrientes o contaminantes, a la remoción de especies. Estudios experimentales multifactoriales han contribuido a la comprensión de cómo

factores abióticos y bióticos interactúan para dar forma a las comunidades. Estos estudios han llevado a una creciente apreciación del rol desempeñado por efectos indirectos en la interacción entre especies. Estos estudios constituyen el fundamento de la teoría de comunidades y ecosistemas. Su alcance debe ser expandido. Es necesario comparar y sintetizar la manera a través de la cual diferentes ecosistemas responden a un tipo particular de estrés y la manera en que un determinado ecosistema responde a distintos estreses. Además de su obvia importancia teórica, dichos estudios pueden establecer la base para una taxonomía funcional de ecosistemas y guiar la investigación en ecotoxicología, restauración y manejo.

- *¿Cuáles son las retroalimentaciones entre las porciones biótica y abiótica de los ecosistemas y paisajes? ¿De qué modo los procesos climáticos, antropogénicos y bióticos regulan los procesos biogeoquímicos?* El trabajo en este tópico debe incluir estudios del intercambio de energía y materiales entre ecosistemas y de las interacciones atmósfera-biosfera y tierra-mar. Más aún, aunque numerosos trabajos han descrito los ciclos biogeoquímicos y los patrones de flujo de energía en el interior de los ecosistemas (en algunos casos a través de un rango de escalas espaciales y temporales), existen pocas teorías mecanicistas para explicar cómo dichos ciclos y flujos son regulados. ¿Cuán robustos son los ecosistemas a perturbaciones? ¿Cuál es el rol de la biota en la regulación de procesos climáticos y de ecosistemas? La investigación en relación con las conexiones entre las porciones biótica y abiótica de los ecosistemas y entre la biología de poblaciones y enfoques ecosistémicos es esencial para comprender cómo estos sistemas responderán al cambio global y constituye uno de los mayores desafíos que enfrentan los ecólogos.

- *¿De qué manera los patrones y procesos a una determinada escala de espacio y tiempo afectan a aquellos en otra escala?* Avances recientes en percepción remota y tecnologías de Sistemas de Información Geo-

gráfica (SIG) permiten examinar patrones ecológicos a escalas espaciales mayores que las posibles con anterioridad. Al mismo tiempo, ha habido una creciente apreciación por la importancia que tienen los procesos a escala espacial pequeña (e.g., dispersión, reclutamiento) en la estructura de poblaciones y comunidades. La escala temporal de estudios ecológicos ha sido extendida por estudios ecológicos de largo plazo y por el desarrollo de nuevas técnicas para reconstruir comunidades y ambientes del pasado. Mientras que la frecuente y continua toma de muestras ha destacado la importancia de variaciones temporales a pequeña escala, además estudios observacionales y experimentales sugieren que las escalas temporal y espacial interactúan (e.g., eventos excepcionales pueden tener un profundo efecto sobre patrones espaciales), estudios teóricos y experimentales que intentan integrar patrones y procesos a través de escalas se han visto estimulados por la creciente disponibilidad de datos a través de escalas temporales y espaciales y por la urgencia por resolver problemas ambientales de gran escala.

- *¿Cuáles son las consecuencias de la variabilidad ambiental, incluyendo perturbaciones naturales y antropogénicas, para individuos, poblaciones o comunidades?* Un concepto fundamental en ecología establece que la variación ambiental puede promover la coexistencia entre genotipos o especies. Resultados teóricos y experimentales recientes han refinado este concepto e identificado condiciones que re-

lacionan la variación ambiental con la estabilidad o cambio comunitario de largo plazo. Estos resultados han dirigido la atención hacia: la manera específica a través de la cual las fluctuaciones ambientales afectan a la poblaciones; el efecto de la variabilidad ambiental sobre las interacciones entre especies; las diferencias intra e interespecíficas en respuesta a variaciones ambientales y a factores bióticos como competencia, depredación o mutualismo.

III. CONOCIMIENTO ECOLOGICO REQUERIDO PARA UNA BIOSFERA SUSTENTABLE

Los problemas ambientales urgentes y sus consecuencias para el bienestar humano sirven como segundo punto de partida (Fig. 3) para identificar prioridades ecológicas de investigación. El crecimiento poblacional humano y sus actividades tienen un efecto profundo en el medio ambiente (Fig. 4); ellos contribuyen al Cambio Global, a la pérdida de la diversidad biológica y a la degradación ambiental. Muchos cambios ambientales antropogénicos tienen consecuencias deletéreas en el bienestar y salud humanos. Puesto que la ciencia ecológica está dedicada a la comprensión de las interacciones entre los organismos y su medio ambiente, es particularmente pertinente a los ecólogos centrarse en las complejas relaciones existentes entre los seres humanos y la biosfera (Roughgarden *et al.* 1989, National Research Council 1989c, Raven 1990, Edmonson 1991). En esta sección consideramos parte del conocimiento ecológico necesario para ali-

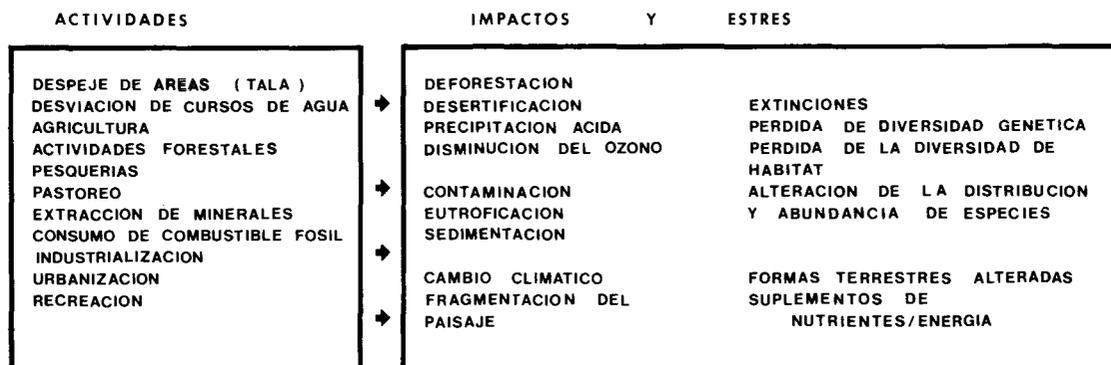


Fig. 4: Actividades humanas que afectan la sustentabilidad de la biosfera.

viar el impacto ecológico de las actividades humanas.

Entre los numerosos problemas ambientales que enfrenta la humanidad hay tres que son particularmente críticos y cuyas soluciones requieren de conocimiento ecológico: el Cambio Global, la mantención de diversidad biológica y la sustentabilidad de sistemas naturales y manejados. Estos tres tópicos representan diferentes facetas del conocimiento ecológico necesario para obtener una biosfera sustentable, no obstante hay una considerable superposición entre ellos. Por ejemplo, las actividades humanas y sus consecuencias ecológicas alteran procesos de Cambio Global y, al mismo tiempo, tienen efectos locales y regionales inmediatos sobre la sustentabilidad de los sistemas naturales y manejados. La diversidad biológica se ve afectada por procesos que ocurren a escalas local, regional y global. La SBI reconoce que procesos globales comunes gobiernan la respuesta de la biosfera a las actividades humanas. Por lo tanto, es probable que principios ecológicos comunes estén envueltos en la solución de los problemas ambientales.

En la Sección A (Aspectos Ecológicos del Cambio Global) discutimos cambios a gran escala en el uso de la tierra, en la química ambiental y en el clima, centrándonos en las interacciones entre la biosfera y el dominio abiótico. En la Sección B (Ecología y Conservación de la Diversidad Biológica) enfatizamos los procesos que afectan la diversidad biológica a diversas escalas. Finalmente, en la Sección C (Estrategias para la Sustentabilidad de los Sistemas Biológicos) abordamos problemáticas de sustentabilidad a escalas local y regional, centrándonos en evaluación ambiental, restauración y manejo, incluyendo la interfase entre los procesos ecológicos y la población humana. En cada sección definimos los alcances de los problemas y la importancia que tiene el conocimiento ecológico para encararlos. En los cuadros destacamos las necesidades inmediatas de investigación, las que también sugieren los tópicos claves de investigación discutidos en la Sección IV (Prioridades de Investigación para una Biosfera Sustentable).

A. Aspectos Ecológicos del Cambio Global

Actualmente las actividades humanas están conduciendo a cambios sin precedentes en los ambientes atmosféricos, terrestre, de agua dulce y marinos de la Tierra. El clareamiento de grandes áreas terrestres, la agricultura, el consumo de combustible fósil y la industrialización incorporan una gran variedad de gases traza y contaminantes a la atmósfera. Las consecuencias potenciales de la alteración de la composición atmosférica van desde el calentamiento climático y la reducción de ozono estratosférico hasta un aumento de la productividad biológica a través del enriquecimiento en CO₂ y nitrógeno, con las subsecuentes alteraciones de los procesos en poblaciones, comunidades, ecosistemas y paisaje. Las actividades humanas también alteran y consumen las reservas de aguas superficiales y profundas y agregan sustancias tóxicas, desechos y contaminantes a lagos, ríos y océanos, alterando así la productividad y diversidad biológica de ecosistemas de agua dulce y marinos. Aunque el Cambio Global es a menudo comparado con el efecto invernadero, es claro que una definición ecológica del Cambio Global debe incluir, además de los cambios climáticos, las alteraciones a gran escala de los patrones de uso de suelo y agua y los cambios antropogénicos de química ambiental.

Los cambios en los ecosistemas de la Tierra son, al mismo tiempo, causa y consecuencia de condiciones ambientales globales alteradas. Para comprender las complejas retroalimentaciones que relacionan a la biota con el aire y el agua se requiere de investigación ecológica sobre el rol de los factores biótico y abiótico en el control de la dinámica de poblaciones, en la estructura de comunidades y en los ciclos bioquímicos. Las causas antropogénicas del Cambio Global en la hidrósfera, atmósfera y clima se encuentran en procesos que ocurren a escalas regionales (*e.g.*, desviación del agua, quema de combustible fósil, deforestación, liberación de clorofluorocarbonos u otros contaminantes). Sin embargo, las consecuencias ecológicas del Cambio Global pueden sentirse primero

a nivel individual, poblacional y comunitario. Por ejemplo, pueden producirse cambios en organismos individuales (*e.g.*, alteración de tasas de fotosíntesis, cambios en comportamiento, actividad microbiana alterada) y en comunidades, como resultado de regímenes alterados de perturbaciones e interacciones entre especies. Cambios, tanto en funciones individuales como en la estructura de comunidades, pueden, en último término, expresarse en cambios de la función del ecosistema. Por lo tanto, las interacciones bióticas y abióticas deben ser comprendidas a lo largo de distintos niveles de organización biológica y a lo largo de distintas escalas espaciales y temporales.

En relación con el Cambio Global existen tres necesidades inmediatas de investigación ecológica básica:

- las causas y consecuencias ecológicas del cambio climático global (Cuadro 1).
- las causas y consecuencias ecológicas de los cambios en la química de la atmósfera, del suelo, del agua dulce y marina (Cuadro 2).
- el impacto de los cambios del uso del suelo y del agua sobre procesos globales y regionales (Cuadro 3).

La importancia del conocimiento ecológico en la comprensión del Cambio Global

El cambio en el uso del suelo y otras actividades humanas ha causado cambios masivos en la biosfera. La deforestación, el empobrecimiento del suelo, la contaminación de los recursos aire y agua y el empobrecimiento de la diversidad biológica se han traducido, en el último siglo, en un dramático Cambio Global. El riesgo de cambio climático agrega una nueva dimensión a los problemas ya existentes como resultado de las actividades humanas. Las consecuencias de las actividades humanas afectan y son afectadas, directa e indirectamente, por la complejidad ecológica —diversidad de especies y hábitat, patrones de ensamblajes ecológicos en el paisaje y diferencias en la capacidad productiva

y de almacenamiento de los ecosistemas. Una mejor información ecológica mejorará las predicciones del Cambio Global que pueden derivarse de las continuas alteraciones en el uso del suelo y agua y de la actividad industrial. Además, permitirá a los ecólogos una mejor predicción de las consecuencias que tendrá a largo plazo el Cambio Global sobre los recursos y la población de la Tierra, proveyendo la base para mejores decisiones de manejo.

La investigación de los aspectos ecológicos del Cambio Global contribuirá a la comprensión de los procesos ecológicos básicos que controlan la biota de la Tierra. En el centro de esta investigación se encuentran dos interrogantes ecológicas fundamentales: ¿Qué factores regulan la dinámica a gran escala de poblaciones de plantas y animales? ¿Qué factores regulan los flujos de energía y materiales (incluyendo nutrientes y contaminantes) en y entre ecosistemas? La respuesta a estas preguntas requiere de estudios ecológicos de las interacciones fundamentales existentes entre sistemas a diferentes niveles de complejidad biológica. La mayor colaboración entre ecólogos y científicos de otras disciplinas, incluyendo ciencias atmosféricas, ciencias del suelo, oceanografía y toxicología ambiental, ayudará al progreso hacia nuevos conocimientos ecológicos sobre estas interacciones. La respuesta a interrogantes ecológicos fundamentales y la extensión del alcance que tiene el conocimiento ecológico permitirá a los ecólogos ayudar de mejor manera a los responsables de la toma de decisiones y en el diseño de políticas que se anticipen, alivien o respondan al Cambio Global.

Los avances en la ciencia ecológica pueden contribuir a la toma de decisiones societarias, mejorando las predicciones sobre las consecuencias globales de las actividades humanas que alteran a sistemas ecológicos. Los estudios ecológicos pueden clarificar procesos biológicos que a su vez regulan los procesos en ecosistemas o climáticos. Por ejemplo, en la actualidad los efectos de la biota en el albedo o en la emisión de gases traza no son bien comprendidos. Por ende, la habilidad predictiva de los modelos de Cambio Global se

CUADRO 1

Causas y consecuencias ecológicas del cambio climático global

La biosfera regula y responde al sistema climático a través de mecanismos de retroalimentación físicos y químicos. Un desafío importante para los ecólogos es comprender los procesos que conectan las especies y los ecosistemas con el clima y predecir las respuestas ecológicas bajo condiciones climáticas que no existen actualmente.

Los procesos ecológicos controlan la emisión y captación de numerosos gases de "invernadero". Los sistemas biológicos también ejercen control sobre balances hídricos y energéticos de superficie, los que son determinantes críticos del clima global. El albedo, la evapotranspiración, la humedad del suelo y la rugosidad superficial son afectadas por las características de la biota terrestre y marina. Por ejemplo, ciertos grupos fitoplanctónicos marinos generan aerosoles de sulfato que actúan como núcleos condensadores de nubes. Estos pueden aumentar la extensión de la cubierta de nubes que poseen un albedo elevado, alterando el balance de radiación global. Consecuentemente, la composición de ensambles de fitoplancton y los factores físicos (e.g. surgencia) y bióticos (e.g., competencia o herbivoría) que regulan la abundancia y distribución del fitoplancton, pueden jugar un rol aún no determinado en el sistema climático global (Keller *et al.*, 1989). De la misma manera, cambios en las características de la cubierta vegetal y en la evapotranspiración pueden influenciar el clima regional e incluso global (Shukla *et al.*, 1990). Es así como los estudios ecológicos que explícitamente conectan procesos biológicos y climáticos, serán útiles para reducir la incertidumbre de los modelos de clima global y en la predicción de las consecuencias climáticas de las actividades humanas que alteran los sistemas ecológicos.

Las respuestas ecológicas al cambio climático son complejas. La documentación de la relación entre cambio climático y comunidades biológicas del pasado ha sido

una importante contribución del enfoque paleoecológico. Las temperaturas pronosticadas para el próximo siglo (Jaegger 1988) son superiores a las experimentadas hasta ahora por la biota de la Tierra en los últimos millones de años y las tasas de cambio proyectadas pueden sobrepasar en más de un orden de magnitud a las experimentadas en cambios globales en los pasados 2 millones de años. Grandes impactos resultarán de: alteraciones de los regímenes de precipitación y perturbación, temperaturas extremas, así como de cambios en la temperatura promedio (Dobson *et al.*, 1989). Las desviaciones geográficas del régimen climático pueden ocurrir con una rapidez mayor que la velocidad con que algunas especies pueden dispersarse hacia nuevas localidades con condiciones adecuadas (Davis 1986, 1989, Graham 1986). Registros de polen cuaternario muestran que la composición de comunidades de plantas ha cambiado continuamente, como respuesta a variaciones climáticas de largo plazo. Existen evidencias de que en algunas, pero no en todas, especies de animales se han producido modificaciones en sus rangos geográficos, las que se han traducido en la formación de nuevos ensambles de especies (Graham 1986). Reciente investigación ecológica en poblaciones y comunidades sugiere que los cambios en la composición de comunidades pueden, probablemente, ser resultado no sólo de limitaciones abióticas a la dispersión, al establecimiento y a la persistencia de especies, sino que también pueden ser resultado de alteraciones en las complejas interacciones entre especies y sus mutualistas, competidores, depredadores o patógenos. La predicción de las consecuencias del cambio climático mejorará con la integración de estudios de distribución actual y pasada de especies, con estudios mecanísticos de interacciones abióticas y bióticas.

Otra probable consecuencia, a largo plazo, del cambio climático global es la modificación de la composición genética de

poblaciones y especies. Es difícil predecir el efecto de la resistencia evolutivamente adquirida respecto a factores específicos de estrés, en relación con la resistencia general al estrés que presentan los organismos. Es probable que muchos organismos que pueden desarrollar rápidamente resistencia a toxinas del medio ambiente (Bishop y Cook 1982), también evolucionan rápidamente como respuesta a cambios de clima y de concentración de gases de "invernadero" (Holt 1990). La selección de tolerancia al calor o a la desecación puede conducir rápidamente a la evolución de genotipos con tolerancia general al estrés, los que a su

vez son resistentes a una variedad de agentes ambientales de estrés y pueden presentar características de historia de vida alteradas (Huey y Kingsolver 1989, Parsons 1989). En contraste, la tolerancia a ciertos tipos de estrés puede aumentar la sensibilidad de los organismos frente a otros (Weis y Weis 1989). Estudios ecológicos que predicen cómo los cambios climáticos pueden alterar el tamaño poblacional y la migración contribuirían a la comprensión de las consecuencias del cambio global sobre la variabilidad genética, sobre la deriva génica y, por lo tanto, sobre la evolución en poblaciones y especies.

CUADRO 2

Causas y consecuencias ecológicas directas de los cambios de la química de la atmósfera, del suelo, del agua dulce y marina

La biota de la Tierra es, a la vez, fuente y depósito para muchos materiales trazas que tienen efectos potenciales directos sobre los sistemas ecológicos. El aumento de la concentración de CO₂ puede influir directamente en los sistemas terrestres, de agua dulce y marinos. Los efectos de la depositación de ácido en sistemas de lagos y ríos están bien documentados. Los efectos potenciales del enriquecimiento de nutrientes, de los pesticidas y de los desechos industriales sobre los procesos ecológicos de suelos y estuarios se han convertido, en los años recientes, en importantes problemáticas de investigación. A medida que la población humana crece, dichos efectos están destinados a ser cada vez más importantes.

Se requiere de estudios de los factores ecológicos que controlan el flujo de materiales en sistemas terrestres, de agua dulce y marinos, así como de estudios de las retroalimentaciones y consecuencias de dichos cambios en el funcionamiento de los sistemas ecológicos. Por ejemplo, para abordar interrogantes sobre el impacto local del ozono generado por las actividades urbanas en zonas templadas, y por la

quema de biomasa en las áreas tropicales (Andreae *et al.*, en prensa), se requiere de estudios ecológicos que relacionen los efectos de niveles elevados de ozono a escalas fisiológicas, de población, de comunidades y de ecosistemas. Por ejemplo, para predecir el efecto de altos niveles de ozono en la distribución de plantas, un enfoque interdisciplinario puede realacionar los estudios fisiológicos sobre la relativa sensibilidad al ozono de especies de plantas con estudios ecológicos de cómo las distintas tolerancias alteran las relaciones competitivas y la susceptibilidad a herbívoros y patógenos.

Para abordar el impacto de la contaminación regional del aire, suelo y agua sobre los sistemas ecológicos a escalas se requiere de estudios multidisciplinarios de los efectos de las actividades humanas sobre los procesos microbianos, los ciclos biogeoquímicos del ecosistema como un todo y de las emisiones de CO₂ y gases trazas a la atmósfera. Para comprender los principales procesos que controlan los flujos de materiales y sus efectos en los sistemas terrestres, de agua dulce y marinos, los ecólogos deben abordar una variedad de interrogantes en colaboración con científicos de otras disciplinas.

CUADRO 3

Consecuencias ecológicas de los cambios en el uso del suelo y el agua

Durante el siglo pasado los cambios en el uso del suelo y el agua han convertido a los sistemas naturales en una variedad de sistemas manejados (e.g., agricultura, ganadería, uso urbano e industrial o silvicultura intensiva), cambiando la química de la atmósfera de la Tierra y alterando los flujos de materiales hacia sistemas de agua dulce y marinos. Las importantes desviaciones de agua dulce realizadas en todo el mundo para la agricultura, la energía hidroeléctrica y el uso residencial han alterado severamente los regímenes de flujo y la química de los ríos más importantes y han destruido las pesquerías. Los efectos de ciertos cambios en el uso del suelo y del agua pueden ser detectados regional y globalmente y ellos pueden alterar procesos a nivel de poblaciones, comunidades y ecosistemas a distancias substanciales del punto inicial de cambio.

Los ejemplos de los efectos del uso del suelo en la emisión de gases de "invernadero" son numerosos. Se ha estimado que sólo la deforestación de los trópicos contribuye con un flujo neto de CO_2 a la atmósfera de alrededor de 1-2,5 Pg/año (Detweiler y Hall 1988, Houghton 1990) y puede también ser causa importante del aumento de NO_2 atmosférico (Luizao *et al.*, 1989). El uso de fertilizantes ha llevado a un aumento en los flujos de gases traza de nitrógeno en ecosistemas templados y pueden tener un impacto aún mayor en los

trópicos. Las crecientes poblaciones de ganado (Cicerone y Oremland 1988) y el aumento de la extensión y producción de arrozales puede representar una fuente importante del aumento global de CH_4 . Al mismo tiempo, el desvío de aguas, la remoción de vegetación nativa y la conversión del suelo para uso humano han aumentado los flujos de sedimentos y nutrientes hacia aguas superficiales alterando, en gran parte del mundo, los regímenes hídricos y la química de lagos, ríos, estuarios y sistemas marinos costeros. Como consecuencia, hay una necesidad urgente por comprender cómo el sistema tierra-agua-atmósfera responde a cambios en el uso del suelo.

Se requerirá de estudios multidisciplinarios en una variedad de escalas espaciales y temporales para abordar los efectos de la conversión del suelo y de la desviación de las aguas en: (1) los procesos microbiológicos del suelo, de los sedimentos y de la columna de agua; (2) las características físicas de suelos y sedimentos; (3) el rol de los procesos fisiológicos y ecológicos en el intercambio de materiales en y entre la atmósfera, el suelo y el agua (ver Cuadro 2). Dichos estudios serán necesarios para la evaluación de las consecuencias bióticas y abióticas de usos alternativos del suelo, incluyendo los relativamente nuevos enfoques de sustentabilidad y la siempre creciente utilización de fertilizantes.

verá mejorada con la incorporación de mecanismos de retroalimentación ecológicos más realistas (Schneider 1988).

Los avances ecológicos también contribuirán a mejorar las predicciones de las respuestas de la biosfera a las condiciones nuevas esperadas como resultado del Cambio Global. Una mejor comprensión de cómo ciertos cambios ambientales específicos afectan a las especies y alteran las interacciones entre ellas permitirá a los

ecólogos hacer mejores predicciones de cómo cambiará la distribución de especies y comunidades y la magnitud de la productividad, como resultado del Cambio Global natural o inducido por el hombre.

Se requiere de estudios teóricos y experimentales para comprender las relaciones entre respuestas ecológicas a varios niveles de organización biológica. Por ejemplo, la información obtenida a partir de estudios fisiológicos debe ser usada para combinar

modelos a escala local e intermedia con modelos climáticos a gran escala. Las experiencias a gran escala y a largo plazo, las técnicas de percepción remota y la disponibilidad de una colección de datos a gran escala ofrecen a los ecólogos nuevas oportunidades para sintetizar su trabajo a escalas regional y global y para la cooperación interdisciplinaria.

Muchas de las necesidades de investigación sobre Cambio Global identificadas por la SBI han sido consideradas en los documentos de planificación del Programa Internacional Geosfera-Biosfera (IGBP) (National Research Council 1988), el Programa de Investigación sobre Cambio Global de los EE.UU. (USGCRP) (Earth System Sciences Committee 1988, Committee on Earth Sciences 1990b), el Programa de Investigación sobre Dinámica del Ecosistema Oceánico Global (GLOBEC) (1988), la Oficina de la Red de Investigación Ecológica a Largo Plazo (LTER) (1990) y las Instituciones Oceanográficas Asociadas (1990). Algunas de estas temáticas han pasado a ser también puntos focales de investigación en los proyectos centrales del IGBP (*e.g.*, cambio en el uso del suelo tropical e interacciones atmósfera-biosfera [International Global Atmospheric Chemistry Program, IGAC], Globally 1989). Cada uno de dichos programas de investigación establece claramente la necesidad de una fuerte participación de los ecólogos en el estudio de las implicaciones locales, regionales y globales de los cambios de la Tierra. Sin embargo, el esfuerzo relativo de investigación dedicado a interrogantes biológicas y ecológicas ha estado drásticamente subrepresentado en muchos programas de investigación del Cambio Global.

Construyendo sobre estos esfuerzos previos, la SBI llama a los ecólogos a una mayor participación en la planificación e investigación de programas en desarrollo, enfatizando especialmente la importancia de la complejidad ecológica en los procesos globales y a conectar estudios de Cambio Global con esfuerzos para comprender la diversidad biológica y la sustentabilidad de los sistemas ecológicos locales y regionales.

B. Ecología y conservación de la diversidad biológica

La diversidad de la vida sobre la Tierra constituye un recurso único para las generaciones futuras. Los 1,4 millones de especies de organismos identificados y catalogados hasta la fecha son sólo una pequeña fracción de los 5 a 50 millones de especies que se piensa que existen. Las actividades humanas tienen consecuencias profundas sobre la diversidad biológica a muchos niveles. La destrucción de hábitat es la principal causa de la velocidad de extinción global, que se estima en aproximadamente 17.500 especies por año, o casi el 0,1% anual de las especies existentes (Wilson 1990). Regionalmente, la introducción de especies y la alteración de las tasas de perturbación pueden favorecer el aumento de la diversidad local, pero la pérdida o destrucción de hábitat, la erupción de especies introducidas o nativas y el manejo de los sistemas explotables tienden a disminuir la riqueza y heterogeneidad de las especies.

La acelerada extinción de especies y la destrucción de hábitat continuará, ya que sólo una pequeña fracción de la Tierra está protegida en parques y reservas y la población humana está creciendo. Los esfuerzos que se hacen actualmente para conservar la diversidad biológica se han centrado en la diversidad a nivel de especies y en la prevención de la extinción. Sin embargo, una definición ecológica de diversidad debe también incluir tanto la diversidad genética necesaria para mantener cada especie como la diversidad de las comunidades y de los ecosistemas que las sustentan. El objetivo de preservar la diversidad a todo nivel —genes, especies, ecosistemas— requiere de una mejor comprensión de cómo interactúan los procesos ecológicos que operan a diferentes escalas temporales y espaciales. Para resolver las problemáticas más cruciales en relación con la diversidad los ecólogos deben:

- describir la distribución global de las especies y sus asociaciones y determinar los factores que afectan las tasas de cambio de la diversidad (Cuadro 4).

- acelerar la investigación en biología de especies raras y en declinación (Cuadro 5).
- determinar los efectos del Cambio Global y regional sobre la diversidad biológica (Cuadro 6).

Las poblaciones de animales y plantas afrontan continuamente cambios de clima, química ambiental, patrones de uso de agua y suelo y fragmentación de hábitat. La destrucción de hábitat lleva directamente a la reducción del tamaño de las poblaciones reproductivas y a la pérdida de la variabilidad genética local; ambas situaciones aumentan la posibilidad de extinción local. Sin embargo, estos efectos pueden ser mitigados si la configuración del paisaje permite que la pérdida local de especies o de diversidad genética sea compensada por la inmigración desde áreas cercanas. Adicionalmente, la desviación de aguas y la creciente contaminación y sedimentación de ríos, lagos y estuarios lleva a menudo a la degradación de hábitat acuáticos valiosos, con la consecuente pérdida de diversidad biológica. Los cambios en patrones de uso del suelo hacen que los hábitat naturales y seminaturales que hospedan la mayor parte de la diversidad biológica estén contiguos a áreas agrícolas intensamente manejadas y a áreas urbanas industrializadas. Aunque las áreas naturales que rodean dichos sistemas manejados funcionan como tampones (Goselink *et al.* 1974), la proximidad de áreas naturales con áreas manejadas significa también que las poblaciones naturales se ven necesariamente afectadas por desechos agrícolas, industriales u otros desechos urbanos y por la demanda de recursos (e.g. agua). Así, los patrones de actividad humana global y regional requieren ser combinados con la descripción de abundancia y distribución de especies y comunidades y con estudios intensivos de los procesos ecológicos que regulan la diversidad.

Para describir los patrones globales y regionales de la diversidad biológica, para determinar los procesos que mantienen la diversidad y para contribuir a la conservación biológica en todos los niveles se re-

querirá de la síntesis de resultados de muchas subdisciplinas de la ecología. La ecología se ha caracterizado por sus numerosos enfoques y subdisciplinas distintas, tales como la ecofisiología, ecología de comunidades, ecología de ecosistemas y ecología del paisaje. Dicha variedad es saludable y necesaria para la comprensión de procesos que operan a distintas escalas espaciales y temporales y que explican los patrones de diversidad biológica. Sin embargo, tenemos por delante tareas de colaboración particularmente desafiantes; por ejemplo: (1) los modelos a escala fina basados en individuos (*i.e.*, aquellos que enfatizan aspectos fisiológicos, comportamiento, desarrollo y genética) deben ser integrados en modelos ecológicos de escala más gruesa (*i.e.*, aquellos que enfatizan estructura poblacional y metapoblacional, ensamble de especies, estructura de comunidades y funcionamiento del ecosistema) y (2) los aspectos físicos del medio ambiente deben ser incorporados a estudios tradicionales, de base biológica, sobre poblaciones e interacciones de especies.

Importancia de la ecología en la conservación de la diversidad

Los desafíos planteados por el Cambio Global, pérdida y fragmentación de hábitat y extinción de especies, tienen el potencial de estimular avances importantes en la comprensión fundamental de los procesos ecológicos. Por ejemplo, el punto central de la ecología de poblaciones y comunidades ha sido la clarificación del modo cómo interactúan los factores bióticos y físicos para explicar la distribución y abundancia de las especies. La amenaza del Cambio Global (ver Sección III-A, Aspectos Ecológicos del Cambio Global) demanda a los ecólogos extender los estudios teóricos y experimentales con el fin de predecir cómo las poblaciones y especies responderán a los cambios de clima y de la química ambiental previstos a gran escala. Los cambios en el uso del suelo y el agua y la fragmentación de hábitat da ímpetu a los estudios sobre interacción entre la configuración del paisaje (incluyendo aspectos de tamaño, forma, aisla-

CUADRO 4

Inventario biológico

Se requiere de un ambicioso programa de inventario biológico, no sólo para catalogar y mapear las principales distribuciones y asociaciones de especies del mundo, sino que también para conectar los patrones de distribución de especies y hábitat con procesos naturales y antropogénicos que afectan a la diversidad biológica (Soulé y Kohm 1989). Este esfuerzo requerirá de la colaboración de ecólogos, sistemáticos y biólogos de recursos naturales que trabajen a lo largo de escalas espaciales y temporales muy distintas, desde ecólogos de ecosistemas que usan percepción remota y análisis de paisaje a gran escala, hasta biólogos de poblaciones que trabajan con formas locales endémicas y raras y con variedades genéticas. Dichas investigaciones requerirán del establecimiento de nuevos y, tal vez, más ajustados esquemas de clasificación de hábitat, basados en los múltiples aspectos de especies individuales, asociaciones complejas de especies e interacciones entre factores bióticos y abióticos. Debe prestarse particular atención a las asociaciones entre ecotonos y los patrones de diversidad biológica global y regional. Un inventario de diversidad biológica del mundo debería incorporar también el tra-

bajo de sistemáticos y genetistas de poblaciones que detallen las relaciones filogenéticas y el trabajo de paleontólogos que describan la distribución de especies y comunidades en el pasado y sus respuestas al cambio ambiental.

El análisis de patrones de especiación ofrece indicios de los procesos ecológicos que explican los cambios en diversidad biológica a través de áreas geográficas extensas. Por ejemplo, la distribución mundial a menudo muestra "centros de endemismo", regiones locales que son particularmente ricas en especies endémicas. Aproximadamente un 15% de las especies de Costa Rica son endémicas en comparación con sólo un 1% en Alemania Occidental (Reid y Miller 1989). Islas oceánicas remotas, como las Islas Hawaiana y Ascensión, muestran una constelación única de flora y fauna endémicas. Los patrones de endemismo son importantes de estudiar porque las especies endémicas son a menudo raras y susceptibles a altas probabilidades de extinción. La descripción de los procesos biológicos que conducen a la formación de nuevas especies ayudará en el establecimiento de programas de conservación y manejo de especies raras.

CUADRO 5

La biología de especies raras y en declinación

Un foco central de la biología de la conservación es el estudio ecológico y evolutivo de especies raras y en declinación.

Especies raras. El estudio de especies raras puede producir percepciones de los procesos distintas de las que producen los estudios de especies más comunes. Los estudios ecológicos se han centrado, principalmente, en especies muy comunes, pero la mayoría de las especies son relativamente raras. Las especies que tienen una distribución geográfica amplia pueden ser muy poco co-

munes localmente. Alternativamente, algunas especies pueden ser endémicas de áreas muy restringidas, pero pueden ser allí muy abundantes. Por ejemplo, la espada de plata hawaiana, *Argyroxiphium macrocephalus*, es una planta que se encuentra sólo en el cráter del volcán Haleakala, pero está allí representada por más de 47.000 individuos (Rabinowitz *et al.*, 1986).

Aunque las especies raras o endémicas se encuentran en mayor peligro de extinción

que las especies comunes de amplia distribución, muchas especies raras muestran períodos de persistencia estable. Más aún, muchas de las especies comunes de hoy en día eran especies raras en el pasado. La habilidad de las especies para persistir cuando son raras depende de la interacción entre los atributos de historia de vida de las especies y las condiciones ambientales. Se piensa que los fenómenos de la historia de vida que gobiernan el crecimiento poblacional y consecuentemente la probabilidad de persistencia de especies raras a largo plazo son muy diferentes a las de especies comunes. Se requiere de estudios para comprender cómo interactúan los patrones de historia de vida y otros atributos asociados con diferentes formas de "rareza" con los factores ambientales.

Especies en declinación. La declinación de especies comunes de amplia distribución refleja, potencialmente, cambios ambientales de largo o corto plazo y probablemente tendrá un gran impacto en las comunidades en las cuales ocurren. La declinación de especies de anfibios ha sido asociada con la destrucción de hábitat locales, con la introducción de depredadores y con el consumo por parte del hombre. Sin embargo, la declinación de ciertas poblaciones ha ocurrido también en ausencia de dichos factores, sugiriendo que en algunos casos pueden estar implicados otros factores, tales como la contaminación por pesticidas, la lluvia ácida, pequeños aumentos de la exposición ultravioleta, o cambios climáticos (Blaustein y Waker 1990). En algunos casos la declinación de ciertas especies puede ser producto de fluctuaciones naturales. Puesto que los anfibios son importantes consumidores de invertebrados y son, a su vez, consumidos por numerosos vertebrados e invertebrados, una declinación de anfibios puede tener consecuencias ecológicas que se extienden a través de muchos ecosistemas. Para evaluar la situación relativa de las especies en declinación se necesita de un inventario global (Cuadro 4), que provea la información a largo plazo y la

comparación con otros grupos taxonómicos.

Respuestas evolutivas. Respuestas evolutivas a largo plazo, en especies que son raras o están en declinación, dependen de la estructura genética fundamental de las poblaciones constituyentes. Las especies raras o en declinación pueden a menudo existir sólo como pequeñas poblaciones localmente aisladas que están sujetas a un mayor nivel de entrecruzamiento. Para comprender el potencial de persistencia o recuperación de dichas poblaciones es esencial determinar la estructura reproductiva, el tamaño poblacional efectivo y el movimiento inter-poblacional.

Las estrategias destinadas a preservar especies en peligro requerirán también de información sobre las restricciones genéticas y demográficas a la adaptación en especies individuales. Los cambios evolutivos dependen tanto del patrón de varianza de características importantes y de covarianza entre características esenciales, como de la velocidad de cambio ambiental y del tamaño y estructura de edad de la población. Los nuevos avances en la teoría genética de los fenómenos de historia de vida serán importantes para comprender si las poblaciones pueden adaptarse al cambio ambiental.

Colonización. Los programas de conservación pueden, en definitiva, basarse en la introducción de especies en peligro a nuevos hábitat, requiriendo cada vez de más investigación de la dinámica de colonización e invasión. ¿Qué atributos de una especie le permiten ser exitosa como invasora o colonizadora? ¿De qué manera el éxito como invasora depende de la red de interacciones con especies que ya están presentes en la comunidad? ¿Qué condiciones promueven el asentamiento de colonizadores tempranos? Los estudios ecológicos de los procesos y factores que regulan, tanto el número de especies de una comunidad como la dinámica del reemplazo de especies, ayudarán a proveer respuestas a dichas preguntas.

CUADRO 6

Efectos del cambio global y regional sobre la diversidad biológica

Los ecólogos están ahora siendo requeridos para predecir el impacto que tienen el cambio climático y el cambio en los patrones de uso del suelo sobre la diversidad biológica (Soulé y Kohm 1989). ¿Cómo afectan a la dinámica de poblaciones y a la diversidad global de las especies los cambios en la química ambiental, la temperatura global, los patrones de precipitación y la presión del viento o la circulación oceánica? ¿Cuáles son las implicaciones de la creciente fragmentación de hábitat que fueron una vez extensos y continuos? Irónicamente, muchos de los modelos ecológicos de crecimiento poblacional e interacciones entre especies se centran casi exclusivamente en factores bióticos más que en factores físicos como temperatura, precipitaciones, turbulencias atmosférica o acuática o configuración del paisaje.

Se requiere de un énfasis renovado en el rol que desempeñan las fuerzas abióticas en la reestructuración de asociaciones bióticas. Aunque las concentraciones y proporciones de nutrientes han sido incluidas en modelos de comunidades de plantas, tanto terrestres como acuáticas, estos modelos a menudo no incorporan otros factores tales como radiación solar, temperatura y humedad del suelo. Sin embargo, los modelos de cultivo o cosecha y producción forestal consideran explícitamente la influencia de la temperatura diaria y de los patrones de precipitación en el crecimiento de los cultivos. Estos modelos pueden ser usados para predecir el impacto del cambio del clima en el crecimiento a corto plazo de la planta mediante la incorporación de los patrones temporales de temperatura y precipitación derivados de modelos climáticos.

Uno de los grandes desafíos será el integrar modelos similares a escala fina con modelos de comunidades y ecosistemas (e.g., modelos de "forest gap") para predecir las consecuencias a largo plazo de los cambios de clima sobre la diversidad biológica (Huston *et al.*, 1988).

Las actividades humanas convierten el paisaje natural en mosaicos de tierras de cultivo, forestas y áreas abandonadas en distintos estados de sucesión. En estos paisajes complejos, muchas especies de animales y plantas ocupan un rango de hábitat de diferentes tipos y pueden exhibir características demográficas distintas en hábitat de diferentes tipos. Debe prestarse mayor atención a los fenómenos de demografía específica de hábitat y de historia de vida, como asimismo a cambios adaptativos locales de la biología reproductiva. Necesitamos comprender mejor los efectos de patrones del paisaje (*i.e.*, el tamaño, forma y distribución de parches de hábitat) sobre el tamaño, dispersión y diversidad de la población a nivel del paisaje local. Cuando el hábitat apropiado es fragmentado, el hábitat interpuesto puede impedir la dispersión en grados variables. Por lo tanto, la matriz existente entre los parches del hábitat, así como la distancia entre parches, pueden ejercer una gran influencia en la estabilidad regional de la población, en el establecimiento de nuevas poblaciones y en la persistencia a largo plazo de especies móviles. Dichos procesos, que dependen de la matriz, requieren que los ecólogos centren más su atención en cómo la geometría específica de los paisajes influye en la diversidad biológica (artículos en Turner 1987, Burgess y Sharpe 1981).

miento y persistencia de parches) y los patrones de diversidad genética y de especies. La necesidad de detener la extinción y declinación de especies dirige la atención a interrogantes que se relacionan con: la genética de tamaños poblacionales

pequeños; movimiento, colonización y dinámica de invasiones; y la persistencia de pequeñas poblaciones cuando interactúan con múltiples competidores y depredadores o cuando establecen nuevas relaciones mutualísticas. La búsqueda de soluciones

para estos problemas estimulará el desarrollo de cada faceta de la ciencia ecológica fundamental.

Cada vez con mayor frecuencia se requiere a los ecólogos que justifiquen los beneficios de la diversidad biológica en comparación con los beneficios humanos que puedan derivarse del desarrollo económico. En las décadas venideras, los ecólogos serán desafiados a evaluar el significado funcional de la diversidad genética, diversidad de especies y diversidad de ecosistemas. La habilidad de los ecólogos para influir el debate sobre diversidad biológica dependerá en gran parte de los avances en la comprensión del funcionamiento de los sistemas naturales y de la importancia de especies individuales en los procesos del ecosistema. Puesto que los recursos humanos son limitados, la sociedad sopesará los costos de conservación de la diversidad contra los costos, a largo y corto plazo, de la pérdida de la misma. Por lo tanto, hay también una necesidad urgente (1) de forjar una nueva teoría que incorpore explícitamente tanto principios económicos como ecológicos, y (2) de desarrollar investigación en los aspectos económicos de la explotación y conservación.

Los avances en investigación ecológica pueden contribuir a la conservación de la diversidad ecológica. El estudio de las especies raras y en declinación tiene inmediata aplicación en el diseño de áreas naturales y en el desarrollo de planes de manejo para su preservación. Aunque existe una necesidad obvia de aislar y manejar áreas relativamente no intervenidas como reservas, la conservación de la gran mayoría de las especies debe realizarse dentro de la "matriz seminatural" de bosques, tierras de pastoreo, ríos y estuarios (Brown 1988). Así, los estudios ecológicos de los efectos que tienen los cambios de uso del suelo y la fragmentación del paisaje sobre la diversidad biológica jugarán un rol cada vez más importante en (1) el diseño de paisajes urbanos y agrícolas que incluyen áreas naturales y seminaturales, y (2) el desarrollo de prácticas de manejo que conserven la diversidad biológica y que satis-

fagan las complejas necesidades de la sociedad moderna.

Las necesidades de investigación en diversidad biológica han sido consideradas en iniciativas del Congreso y de variadas agencias, y en diversos documentos de planificación nacional e internacional (e.g., National Research Council 1989b, National Science Board 1989, Reid and Miller 1989, Soulé y Kohm 1989, Di Castri and Younes 1990, Elswert 1990, and McNeely *et al.* 1990). Construyendo sobre estos esfuerzos previos la SBI llama a nuevos programas de investigación enfocados en: (1) el rol de la diversidad biológica en el control de los procesos ecológicos, y (2) el complejo set de procesos ecológicos que dan forma a los patrones de diversidad. Dichos estudios ecológicos contribuirán también a la comprensión de procesos que fundamentan el Cambio Global y de los principios necesarios para un uso sustentable de la biosfera.

C. Estrategias para la Existencia de Sistemas Ecológicos Sustentables

Los seres humanos dependen de sistemas ecológicos naturales y manejados para la obtención de alimento, refugio, vestuario y aire y agua limpios. A medida que la demanda por productos y servicios de la biosfera aumenta, aumenta también la necesidad de comprender el complejo conjunto de interacciones que hay entre los seres humanos y la biosfera. Los enfoques ecológicos para la comprensión del cambio ambiental incluirán, cada vez más, los roles desempeñados por los seres humanos tanto como agentes de cambio como de población que responde al cambio.

Virtualmente cada ecosistema de la Tierra ha sido influido, hasta cierto punto, por las actividades humanas. Los efectos van desde la influencia indirecta de contaminantes distribuidos globalmente en áreas remotas o inhabitadas, hasta la influencia directa de actividades que remueven especies, alteran su distribución o reestructuran paisajes completos. Más aún, grandes áreas de la superficie de la Tierra están cubiertas por ecosistemas, tales como

agroecosistemas y plantaciones forestales, que han sido diseñados y mantenidos por el hombre. Son características de estos sistemas manejados: la baja diversidad de especies; un insumo de grandes cantidades de energía y nutrientes para su mantención, y la extracción de energía adicional, biomasa y nutrientes. Muchos ecosistemas son utilizados también con fines recreativos, manejo de cuencas de ríos o como reservas para mantener la diversidad biológica.

A medida que la población humana continúa creciendo establecerá fuertes demandas adicionales sobre los ecosistemas de la Tierra. Aún si hoy en día la población mundial se equilibrara, la presión para aumentar la calidad de vida de la población existente abrumaría los recursos de la Tierra. Con el fin de prevenir o revertir la degradación de los recursos de la biosfera, el uso de dichos recursos por parte del hombre debe ser sustentable. Con el fin de trabajar hacia el objetivo de sustentar la biosfera (Brown 1989) se requiere de avances en las esferas política, social y económica, en agronomía y manejo de recursos, así como en ecología. La actual generación de seres humanos debe aceptar el desafío de desarrollar métodos para derivar a partir del medio ambiente los recursos necesarios y para hacer uso de él con otros fines sin comprometer la habilidad de futuras generaciones para mantenerse a sí mismos y mantener su calidad de vida.

Para promover una biosfera sustentable la ciencia ecológica debe:

- determinar los patrones e indicadores de respuestas de los sistemas ecológicos a estrés (Cuadro 7).
- proveer pautas y técnicas para la restauración de sistemas ecológicos (Cuadro 8).
- desarrollar y aplicar la teoría ecológica al manejo de sistemas ecológicos (Cuadro 9).
- dar mayor desarrollo a nuestra comprensión ecológica sobre especies introduci-

das, pestes y patógenos (Cuadro 10) y aplicar la teoría ecológica al manejo de enfermedades infecciosas (Cuadro 11).

- desarrollar enfoques interdisciplinarios y multidisciplinarios que integren ecología, economía y otras ciencias sociales (Cuadro 12).

Aunque el significado exacto de "sustentabilidad" es activamente debatido (Shearman 1990), nosotros utilizamos el término para implicar prácticas de manejo que no degraden los sistemas explotados o ninguno de los sistemas adyacentes (Turner 1988). El logro de la sustentabilidad a menudo requiere tanto de mínimo subsidio a sistemas manejados, de tal manera que ellos sean relativamente autosuficientes, como de la restauración de sistemas dañados cuyos productos y servicios son esenciales para el bienestar humano. Puesto que el crecimiento incontrolado de la población humana y el mal uso de los recursos degradan la biosfera, la sustentabilidad también implica "estándares de consumo que estén en los límites de las posibilidades ecológicas y a los cuales todos pueden aspirar" (World Commission on Environment and Development 1989).

Los sistemas naturales proveen de un punto de referencia para definir y detectar degradación ambiental (Cuadro 7) y para la creación de modelos de restauración y manejo ambiental (cuadros 8 y 9). Además, importantes interacciones asocian a los sistemas manejados con los naturales a varias escalas. Por ejemplo, a menudo los sistemas manejados son afectados en forma crítica por especies "silvestres". Estas pueden ser pestes o patógenos que reducen la productividad (Cuadro 10) o pueden jugar un rol beneficioso sirviendo como fuentes de reclutamiento en proyectos de restauración, como simbioses esenciales de especies explotables (e.g., como polinizadores o micorrizas), o como agentes de control biológico (e.g. depredadores, patógenos o competidores de especies pestes nocivas). El uso del conocimiento obtenido de sistemas naturales para generalizar sobre los procesos en sistemas manejados depende de que la investigación ecológica

CUADRO 7

Indicadores de la respuesta ecológica al estrés

Las actividades humanas inducen estrés en los sistemas ecológicos mediante la introducción de contaminantes, alterando las formas del paisaje y por adición o remoción directa de organismos. Dichas actividades afectan indirectamente la composición de especies y alteran las interacciones interespecíficas en las comunidades afectadas, modificando finalmente el flujo de los materiales naturales y antropogénicos a través del sistema (Levin *et al.*, 1989). Para comprender y atenuar los efectos de presiones antropogénicas sobre sistemas naturales se requiere de investigaciones sobre cómo las diferentes presiones afectan el comportamiento y la fisiología de individuos, de procesos poblacionales y comunitarios y el funcionamiento del ecosistema dentro de sistemas particulares y entre sistemas (Westman 1985). Adicionalmente, el potencial de interacción entre múltiples agentes de estrés requiere de una mayor explicación (e.g., Sheenan *et al.*, 1984). La investigación requerida incluye detectar y cuantificar patrones en espacio y tiempo y explicar los mecanismos subyacentes.

Indicadores. La definición y evaluación de respuestas ecológicas a distintos estreses es un problema experimental de envergadura. La ausencia de indicadores de sensibilidad al estrés ambiental limita la detección de cambio ecológico en etapas tempranas y seriamente impide la comprensión y el manejo efectivo de los sistemas ecológicos (Barrett y Rosemberg 1981). En algunos ecosistemas la evaluación funcional de procesos ecosistémicos —tales como productividad y ciclaje de nutrientes— son, a menudo, indicadores menos sensibles del estrés del ecosistema si se les compara con propiedades estructurales como la composición de especies (Schindler 1987). En algunos casos, cuando las funciones a nivel de ecosistemas llegan a cambiar, ya ha tenido lugar una extensa degradación. Por lo tanto, las poblaciones individuales o atributos de comunidades son probablemente

mejores indicadores de la respuesta del ecosistema al estrés (Karr 1991).

Idealmente, los indicadores deberían ser elegidos en base a sus velocidades de respuesta o sus sensibilidades a un estrés específico. (Cairns 1977, National Research Council 1986). Puesto que las poblaciones, comunidades y ecosistemas no perturbados pueden variar considerablemente a lo largo del tiempo y, con el fin de determinar si ha habido un cambio no deseado, es esencial conocer la variabilidad basal del ambiente físico y de los indicadores biológicos seleccionados (Sheenan 1984). Queda por ver si pueden desarrollarse indicadores que optimicen la razón sensibilidad-variabilidad.

Se requiere de una gran cantidad de investigación básica antes de poder usar los indicadores de cambio ambiental con confianza. El desarrollo y prueba de indicadores ambientales requiere de (1) estudios a largo plazo para establecer la variabilidad basal; (2) experimentos de perturbación en terreno a escalas de tiempo, intensidad y duración adecuadas para evaluar la sensibilidad y especificidad de los indicadores (Likens 1985, Schindler 1987); y (3) la comparación de sistemas expuestos a estreses de distinto tipo y magnitud (Steele *et al.*, 1989, Cole *et al.*, 1990). El acceso a sitios de investigación de largo plazo y a bases de datos (Strayer *et al.*, 1986, Likens 1987) que pueden ser compartidos por muchos proyectos (Kitchell *et al.*, 1988) ofrece a los ecólogos oportunidades para desarrollar y evaluar indicadores ecológicos en condiciones interdisciplinarias.

Sistemas de evaluación. Para determinar las consecuencias ambientales de actividades humanas específicas, deben desarrollarse sistemas de evaluación y reglas para extrapolar desde los sistemas experimentales a sistemas naturales o manejados. El problema de la extrapolación, involucrando principios básicos de escala ecológica, es

esencial para el desarrollo de sistemas de evaluación (Levin *et al.*, 1989). La escala espacial o la complejidad organizacional de un sistema ecológico y el tipo, duración y frecuencia de los estreses antropogénicas pueden afectar la respuesta del sistema a un estrés específico. La verificación de las reglas de extrapolación requiere de evalua-

ciones experimentales y observacionales a distintas escalas (Frost *et al.*, 1988), involucrando la colaboración entre científicos y agencias (Mooney *et al.*, 1991). Así, investigación ecológica es necesaria a escalas proporcionales con la restauración y manejo de sistemas naturales como un todo.

CUADRO 8

Restauración de sistemas ecológicos

La restauración ha sido llamada "la prueba decisiva de la ecología" (Bradshaw 1987) y la "evaluación más conclusiva de la teoría ecológica" (Ewel 1987). Con distinto grado de éxito se han realizado numerosos intentos para restaurar sistemas ecológicos degradados (Holdgate y Woodman 1986, Kline y Howell 1987, Ashby 1987). Para mejorar la frecuencia de éxito y el costo-efectividad de la restauración se requiere de una mejor comprensión de procesos ecológicos fundamentales, tales como el ciclaje de nutrientes, sucesión, competencia y depredación, como asimismo de la comprensión de las interacciones entre los factores bióticos y abióticos.

Los efectos de los factores abióticos sobre la biota tienen una larga y destacada historia en la investigación ecológica. Muchos de los problemas asociados con la restauración implican una escasa comprensión de cómo los factores físicos limitan el establecimiento y crecimiento de especies en sistemas degradados. Los factores físicos pueden afectar directamente la recuperación de poblaciones. Por ejemplo, intentos por restaurar sitios de desechos mineros se han visto demorados ya que luego de una preparación inicial el suelo colapsa en la forma de un medio denso a través del cual las raíces no pueden penetrar con facilidad (Rimmer 1982). Los factores físicos pueden también afectar a las especies en forma indirecta a través de sus efectos sobre las interacciones interespecíficas. Por ejemplo, la exposición a estrés

puede alterar la susceptibilidad de recuperación de poblaciones de plantas a herbivoría (Louda 1988).

Adicionalmente, los procesos poblacionales y comunitarios pueden tener un poderoso efecto sobre los procesos del ecosistema. Las fluctuaciones de una determinada población pueden repercutir a través de todos los niveles tróficos causando cambios de productividad, ciclaje nutrientes y flujo de contaminantes. Es ahora manifiesto que la heterogeneidad biogeoquímica de los continentes ha sido estructurada en gran medida por las dinámicas de poblaciones animales (Naimann 1988). Los ecólogos también reconocen que las dinámicas de poblaciones animales están acopladas a escalas continentales e intercontinentales (Brown y Maurer 1989, Holling 1988).

La investigación básica del acoplamiento entre procesos comunitarios y funcionamiento del ecosistema es fundamental para progresar en la restauración de ecosistemas. La investigación ecológica puede proveer un marco conceptual para guiar los proyectos de restauración ecológica y aumentar su eficiencia. Para facilitar el desarrollo de dicho marco se requiere de apoyo financiero e institucional para investigar en un amplio rango de tipos de comunidades y hábitat y en todos los aspectos ecológicos de la restauración, desde genética de poblaciones hasta el funcionamiento del ecosistema.

CUADRO 9

Desarrollo y aplicación de la teoría ecológica al manejo de sistemas ecológicos

Los ecosistemas manejados y naturales forman un continuo desde monocultivos de cosecha en líneas ordenadas a sitios prístinos inexplorados. Grados intermedios de manejo se aplican a sistemas seminaturales como pesquerías, ganadería y tierras forestales y parques nacionales. Los sistemas manejados, generalmente, tiene una diversidad genética y de especies más baja que los sistemas naturales, con genotipos o especies adaptadas a regímenes ambientales relativamente constantes. Los ciclos de nutrientes relativamente abiertos de los sistemas manejados a menudo se traducen en impactos significativos para los sistemas circundantes. Los sistemas manejados están habitualmente sometidos a frecuentes y severas perturbaciones intencionales (*i.e.*, manejo) que interfieren con procesos ecológicos de largo plazo.

Puesto que el bienestar humano depende de los sistemas ecológicos, los sistemas manejados deben caracterizarse por su estabilidad y elasticidad a medida que ocurren los cambios ambientales. Enseñanzas obtenidas a partir de sistemas naturales sugieren que la sustentabilidad de los sistemas manejados puede ser aumentada por ciclos cerrados de nutrientes (Coleman y Hendrix 1988), por una mayor diversidad genética de especies y por una menor influencia negativa en áreas circundantes (Cox 1984). En cierto sentido, un ecosistema "diseñado" debe ser construido usando los sistemas naturales como modelo (ver Coleman 1989).

Experimentos. La ciencia ecológica tiene mucho que contribuir para asegurar la sustentabilidad de los sistemas ecológicos enfrentados a la explotación humana. Adicionalmente, el avance de la ciencia ecológica se acelerará enormemente si las acciones de manejo son estructuradas como experimentos a gran escala. Las grandes perturbaciones experimentales tienen una historia destacada de contribución a la ecología de ecosistemas (Likens 1985) y son esen-

ciales para la rápida evaluación y comparación de estrategias alternativas de manejo (Walters 1986). Cada proyecto importante de desarrollo o cada intervención de manejo es una oportunidad de aprendizaje si se cuenta con una línea basal e información de seguimiento adecuada y si se emplea el apropiado enfoque estadístico. Acoplando dichas experiencias a gran escala con estudios en sistemas experimentales de pequeña escala se podrán comprender los efectos no lineales, las interacciones entre factores y los roles de las covariantes.

La colaboración entre ecólogos, estadísticos y administradores ofrece la perspectiva de desarrollar herramientas experimentales poderosas para evaluar las consecuencias y efectividad de las opciones de manejo (Matson y Carpenter 1990).

Modelaje. El modelaje ecológico está sufriendo un rápido avance y progreso. Una nueva generación de modelos incorporará los efectos de los factores fisicoquímicos y de las interacciones a nivel comunitario para analizar la dinámica de poblaciones y ecosistemas manejados. Las experiencias de manejo ofrecen la oportunidad de desarrollar, evaluar y mejorar los modelos a escalas que van desde organismos individuales hasta ecosistemas (Kitchell 1991). Fuertes manipulaciones a escala de manejo fuerzan "fracasos informativos" de los modelos de manejo y llevan a la rápida identificación de los modelos que tienen un mejor comportamiento en el contexto del manejo (Walters 1986).

Hoy en día la disciplina ecológica enfrenta el desafío de ampliar las perspectivas ecológicas para introducir los valores y necesidades humanas y para identificar los principales mecanismos mediante los cuales los sistemas manejados y naturales se afectan unos a otros en su bienestar a largo plazo. Si los sistemas manejados se visualizan como integrantes de una comunidad con granjas, suelos no cultivados y

sectores de recursos naturales (forestal, pantanoso, acuático), entonces se requiere de investigación para examinar las interacciones que ocurren más allá de las granjas, bosques o parques y el impacto de las

fuerzas económicas y sociales (National Research Council 1990). Un mundo tan alterado por las actividades humanas ofrece la oportunidad y el desafío para expandir el alcance de la disciplina ecológica.

CUADRO 10

Especies introducidas, pestes y patógenos

La importancia de las especies introducidas, las pestes y los patógenos no puede ser ignorada, ya sea que estemos restaurando ecosistemas, creando nuevos o tratando de predecir cambios en los sistemas existentes. Muchos ecosistemas antropogénicamente alterados se han caracterizado por problemas asociados con pestes. En el futuro, a medida que las especies son introducidas o migran como respuesta a cambios ambientales, muchas de las especies que son deseables en la actualidad pueden convertirse en pestes en su nuevo contexto ambiental, mientras que algunas pestes pueden hacerse más perniciosas.

El control de pestes agrícolas puede depender de prácticas de cultivo (Phillips *et al.*, 1980), de la introducción de agentes biológicos de control (Batra 1982), del uso de pesticidas químicos o de la combinación de estos u otros métodos. Basándose sobre una larga historia de estudio de las técnicas de control de pestes, se requiere de investigación ecológica para mejorar la comprensión de las bases biológicas del control. Por ejemplo, se requiere de investigación para resolver controversias sobre: la naturaleza de la dinámica poblacional depredador-presa (Hassell *et al.*, 1989) en experiencias de control biológico exitosas y fracasadas (*e.g.*, Murdoch *et al.*, 1985, 1989); el número de especies de enemigos naturales y los atributos biológicos de dichas especies a ser usadas en programas de control biológico (*e.g.*, Crawley 1987, Mayers 1987, Mayers *et al.*, 1989); y el área de origen de enemigos naturales introducidos y el grado de su previa exposición evolutiva a las pestes (Hokkanen y Pimentel 1989, Pimentel y Hokkanen 1989). Adicionalmente, el grado de interacciones sinérgicas o antagonísticas de las pestes (Haynes

et al., 1980, Allen y Bath 1980) bajo escenarios cambiantes (Pimentel 1977) requiere de mayor explicación.

Las especies introducidas y los organismos genéticamente alterados son "pestes" potenciales que merecen consideración ecológica. Los ecosistemas "diseñados" pueden incluir especies introducidas o alteradas (Whalen 1986, Gasser y Fraley 1989). ¿Se "escapará" y se transformará en peste alguna de estas formas (Ellstrand y Hoffman 1990)? ¿Cuál es su potencial si son introducidas en sistemas relativamente no manejados (Doebly 1990)? Se requiere de experiencias ecológicas críticas para probar hipótesis específicas generadas por estas interrogantes (*e.g.*, Regal 1987, Regal *et al.*, 1989, Tiedje *et al.*, 1989, Hoffman 1990).

La propagación de enfermedades infecciosas es un fenómeno ecológico, esencialmente una interacción hospedador-parásito. Este punto es a menudo ignorado en los estudios epidemiológicos, aunque los modelos epidemiológicos iniciales (*e.g.*, aquellos para la malaria) eran explícitamente ecológicos. Recientemente, las enfermedades virales y de otro tipo han sido examinadas en el mismo contexto que ha sido usado para las epizootias (Anderson y May 1979, May y Anderson, 1979). Fusionando técnicas epidemiológicas y ecológicas, este enfoque considera la mortalidad inducida por la enfermedad y tamaño poblacional variable, mezcla no-homogénea y otros factores ecológicos. Consideraciones de tipo evolutivo, como la evolución de virulencia reducida o elevada, también proveen una gran variedad de incógnitas de investigación y pueden sugerir posibles enfoques ecológicos para el manejo de enfermedades.

CUADRO 11

La ecología de la propagación de enfermedades

Esfuerzos recientes para perfeccionar los modelos con base ecológica de la transmisión de enfermedades están generando nuevos conocimientos que mejorarán los esfuerzos para controlar las enfermedades humanas (Anderson 1989). Estos métodos y los estudios experimentales relacionados, han identificado varios factores que tienen consecuencias complejas en la transmisión de enfermedades en poblaciones humanas (Hassell y May 1989).

La frecuencia y la naturaleza del contacto entre individuos infectados y susceptibles determina en gran medida la propagación de la enfermedad. Por ejemplo, las migraciones rurales-urbanas afectan las probabilidades de contacto al cambiar, tanto los patrones de movimiento de los individuos como las densidades poblacionales. Los patrones de comportamiento pueden también influir en la tasa de propagación de ciertas enfermedades (e.g., el número de parejas en enfermedades de transmisión sexual). Estudios interdisciplinarios que combinan ecología, demografía humana y ciencias sociales pueden contribuir a una mejor comprensión del rol de la migración y el comportamiento en la transmisión de enfermedades.

La transmisión de enfermedades a menudo implica hospedadores múltiples con

patrones de historia de vida complejos, como es el caso de la schistosomiasis. El análisis ecológico de historias de vida combinado con técnicas modernas de análisis de sensibilidad puede identificar eslabones sensibles en el ciclo de transmisión, resultando en un mejor programa de erradicación y control.

La transmisión de enfermedades puede también ser regulada por factores intrínsecos y extrínsecos que afectan la susceptibilidad de los individuos. La susceptibilidad a las enfermedades infecciosas puede variar con la edad, sexo, raza, genotipo u otras características intrínsecas de los individuos. Más aún, factores extrínsecos como nutrición deficiente, exposición a compuestos químicos tóxicos o el estrés inducido por migración, pueden alterar la susceptibilidad a la enfermedad. Tomando en cuenta dichos factores ecológicos, la confiabilidad de los modelos epidemiológicos como herramientas de manejo de la salud pública seguirá en aumento (Anderson 1989). Adicionalmente, la perspectiva ecológica—con su énfasis en procesos poblacionales y evolutivos— se integrará cada vez más con las perspectivas inmunológicas, de genética humana y de salud ambiental sobre propagación de las enfermedades humanas.

CUADRO 12

Procesos ecológicos y poblaciones humanas

Ninguna discusión sobre los problemas ambientales de la Tierra es completa sin una explícita consideración del crecimiento y de los cambios en patrones demográficos de la población humana. A medida que la población mundial continúa creciendo, y mientras las naciones en desarrollo se

mueven hacia estándares de vida que imitan aquellos de naciones más desarrolladas, los efectos del crecimiento de la población humana sobre los recursos de la Tierra se acelerarán. Es esencial considerar el impacto de mayores demandas económicas por recursos renovables y no renovables sobre

los sistemas ecológicos y reconocer que los seres humanos son un elemento esencial del ecosistema que estudiamos.

Las problemáticas asociadas con el crecimiento poblacional son amplias, incluyendo factores tales como: cambios en la renta *per cápita* y en la distribución de recursos, contaminación y degradación ambientales crecientes, problemas de salud y pobreza y los efectos de la expansión urbana, industrial y agrícola; en especial, la integración de intereses ecológicos y socioeconómicos. Aun aquellos factores que son primariamente económicos tendrán efectos ambientales sustanciales.

La población humana totaliza ahora 5,2 billones y está aumentando a una tasa de 1,8% al año. Sin embargo, la tasa promedio de crecimiento enmascara disparidades entre poblaciones de distintas regiones y de distintas naciones. El cambio de la demografía, desde una situación de alta tasa de nacimiento y alta tasa de muerte a una de baja renovación llamada "transición demográfica", ha ocurrido en la mayoría del mundo desarrollado, pero no así en la mayoría del mundo en desarrollo. En gran parte del mundo en desarrollo las tasas de mortalidad han declinado en forma importante después de la Segunda Guerra Mundial; sin embargo, las tasas de nacimiento en muchos casos han aumentado y sólo recientemente han comenzado a declinar. Las consecuencias ecológicas de la "transición demográfica" en un gran número de naciones en desarrollo no han sido exploradas a fondo.

Hoy en día muchas naciones desarrolladas tienen tasas de fertilidad total de reemplazo (TFR) de alrededor de 2,1, que corresponden al número promedio de hijos sobrevivientes que una mujer tendrá en su vida. Dicho patrón de reemplazo genera un tamaño estable de población. Sin embargo, muchos países en desarrollo tienen una TFR de 4 o más, lo que implica un rápido crecimiento de la población. Los esfuerzos para reducir las tasas de nacimiento requerirán de mayor información y experiencia

sobre la interacción entre poblaciones humanas y recursos. Deben también ser comprendidas las restricciones sociales y económicas que previenen el uso adecuado y efectivo de los recursos.

Los efectos que tiene el crecimiento de la población humana sobre la salud y bienestar del hombre no pueden ser tratados independientemente de las problemáticas de distribución y disponibilidad de recursos. A menudo, niveles crecientes de pobreza y enfermedad en localidades geográficas específicas pueden ser atribuidos más a cambios de patrones de productividad agrícola que a un severo incremento del tamaño de la población. Por ejemplo, en algunas regiones de América Central el cambio de producción de cultivos domésticos a cultivos de exportación contribuye más a la pobreza y a la desnutrición que el creciente aumento de la población (Durham 1979). El análisis ecológico de los patrones demográficos humanos debe incorporar los efectos a largo plazo de los cambios en los patrones de disponibilidad y distribución de recursos, junto con las implicaciones socioeconómicas de estos patrones cambiantes.

Existe una necesidad real de referir las técnicas ecológicas, en especial los métodos de biología poblacional, a los problemas del crecimiento de la población humana. Dichos estudios requerirán de una detallada investigación de: la estructura demográfica humana, variación de los patrones de crecimiento a través de las distintas regiones, implicaciones de los patrones de migración y la cambiante estructura de edad. Estas investigaciones deben estar relacionadas con estudios de los patrones de cambio en: el uso de la energía, la producción y distribución de recursos, la propagación de enfermedades y la expansión urbano-industrial. Para comprender totalmente cómo las poblaciones humanas afectan y son afectadas por los procesos ecológicos, deben desarrollarse en mucho mayor grado las complejas interfases entre la ecología y las ciencias sociales y económicas y las políticas de análisis.

explícitamente compare procesos en sistemas naturales y manejados y de que se enfoque en las interacciones de sus interfaces.

La importancia de la ciencia ecológica en el desarrollo de sistemas ecológicos sustentables

La investigación destinada al desarrollo de estrategias ecológicas para una biosfera sustentable producirá un avance fundamental en la comprensión de los procesos ecológicos. Como ha sucedido en el pasado, los estudios ecológicos aplicados a sistemas afectados por el hombre seguirán haciendo importantes contribuciones a la comprensión de los fenómenos ecológicos básicos (e.g., dinámica de poblaciones, sucesión, sistemas depredador-presa y procesos ecosistémicos). La necesidad de extrapolar y generalizar los principios ecológicos a escalas similares a aquellas de la evaluación ambiental, restauración y manejo, promoverá cada vez más el desarrollo de enfoques teóricos y experimentales que unan procesos a través de escalas. Además, los ecólogos serán desafiados a integrar las perturbaciones inducidas por el hombre (con tipo, frecuencia, duración, intensidad y extensión características) en modelos del efecto de estrés y perturbaciones sobre las poblaciones, sobre la interacción entre especies y sobre los procesos ecosistémicos.

La ciencia ecológica puede proveer de algunas de las herramientas necesarias para evaluar, restaurar y manejar los sistemas de la Tierra que sustentan la vida. Para definir y detectar degradación ambiental y para guiar la restauración de sistemas ecológicos se requiere de estudios que conecten los procesos a nivel de poblaciones y comunidades con las funciones del ecosistema. Además se requiere de estudios ecológicos que clarifiquen el rol de la biota en la mediación del transporte, destino y efectos de contaminantes y de sustancias tóxicas en el medio ambiente. El enfoque ecológico aplicado a la toma de muestras, el análisis estadístico y a la evaluación experimental de mecanismos fundamentales

será útil para mejorar la evaluación de las consecuencias de las estrategias de restauración y manejo.

En todo este trabajo será esencial combinar estudios de población humana con aquellos que evalúan los patrones de cambio en el uso de recursos, de la calidad del aire y el agua o de los climas globales y regionales. Algunos de los más importantes tópicos de investigación de la próxima década estará en la interfase de las ciencias sociales, económicas y ecológicas. Estos tópicos incluyen tanto el efecto de los seres humanos en el medio ambiente como las consecuencias del cambio ambiental en la población y bienestar humanos.

La tarea de evaluar, restaurar y manejar sistemas ecológicos sustentables sólo puede ser abordada a través de esfuerzos de investigación amplios, integrados y organizados. Los esfuerzos actuales para evaluar y restaurar ecosistemas específicos (e.g., humedales, sitios de explotación minera) o para manejar sistemas sustentables (e.g., recursos agrícolas, forestales o pesqueros) representan pasos iniciales y necesarios hacia el objetivo de una biosfera sustentable. Sin embargo, dichos esfuerzos no están actualmente mancomunados en un marco de investigación amplio e integrado. Dicho marco es necesario porque los procesos ecológicos conectan a las poblaciones naturales y manejadas con los ecosistemas, y porque los principios ecológicos tradicionales son el fundamento de estrategias de manejo efectivas. Se requiere también de un enfoque amplio para unir los estudios de prácticas de manejo sustentables con las problemáticas de Cambio Global y de diversidad biológica.

Las bases para un enfoque más amplio en la investigación de sistemas ecológicos sustentables han sido establecidas por científicos trabajando en los campos de conservación biológica (e.g., Soulé y Kohm 1989, Raven 1990) y del uso sustentable de recursos (National Research Council 1989a, 1990). La SBI propone la formación de un marco de investigación integrado que coordine los actuales esfuerzos de investigación y que inicie nuevos programas de investigación dedicados a incrementar la sustentabilidad de la biosfera.

IV. INVESTIGACION PARA UNA BIOSFERA SUSTENTABLE: PRIORIDADES Y TOPICOS CLAVES

Después de considerar las fronteras intelectuales de la ecología y el conocimiento ecológico necesario para resolver urgentes problemas ambientales (Fig. 3), hemos identificado tres prioridades de investigación (Fig. 5) —*Cambio Global, diversidad biológica y la sustentabilidad de los sistemas ecológicos*—. Estas tres áreas prioritarias han sido desarrolladas en la Sección III, en la que definimos su alcance, discu-

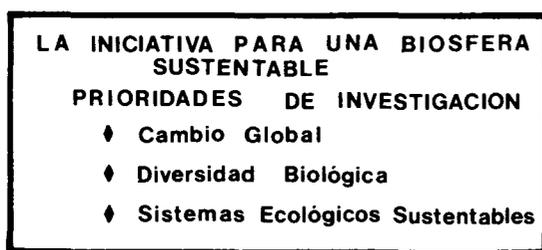


Fig. 5: Prioridades de investigación: comprensión del rol que tiene la complejidad ecológica en los procesos globales, las causas y consecuencias ecológicas de la diversidad biológica y los procesos ecológicos básicos que afectan la sustentabilidad de sistemas ecológicos naturales y manejados.

timos su importancia e identificamos necesidades de investigación. En esta sección introducimos los tópicos claves de investigación que abarcan las tres áreas prioritarias y mostramos las conexiones entre ellas. Investigación en cada una de estas tres áreas tiene la ventaja de desarrollar la disciplina de la ecología y de producir información esencial para resolver problemas ambientales.

Las tres áreas prioritarias están interrelacionadas. Puesto que los elementos de la naturaleza están naturalmente ligados por procesos ecológicos, una determinada actividad humana puede tener implicaciones para todas estas tres áreas. Por ejemplo, la deforestación puede alterar los climas regionales mediante la alteración de los ciclos hidrológicos, puede reducir la diversidad local de especies a través de la remoción de hábitat y la inhibición de la dispersión y puede poner en peligro la sustentabilidad

de las pesquerías al aumentar la sedimentación en los cursos de una cuenca. Además, las tres prioridades plantean desafíos comunes a la disciplina ecológica. Por ejemplo, la implementación de cada una de estas prioridades requerirá de una mejor comprensión de las interacciones entre los componentes bióticos y abióticos de los sistemas ecológicos; de una mejor síntesis de los enfoques ecológicos con los evolutivos; y de nuevos estudios teóricos y empíricos que relacionen patrones a lo largo de diferentes escalas espaciales, temporales y organizacionales diferentes.

Reconociendo la interrelación y el fundamento ecológico común de las tres áreas prioritarias, hemos identificado diez tópicos claves de investigación (Tabla 1) que adicionalmente definen, en forma más amplia, las tres áreas prioritarias. El orden de presentación de estos tópicos de investigación no refleja diferencias en su importancia. En cambio, cada tópico representa una parte integral de la investigación de la SBI, necesaria para ayudar a resolver problemas ambientales. Para cada tópico de investigación hemos listado ejemplos de las interrogantes de investigación que podrían ser abordadas. Estas listas no pretenden ser exhaustivas, sino que sugieren el rango de enfoques de investigación ecológica requeridos para abordar cada tópico de investigación.

V. RECOMENDACIONES DE INVESTIGACION

Tres recomendaciones de investigación específica surgen de las necesidades de investigación insatisfechas en las tres áreas prioritarias de la SBI (Fig. 3).

* *Recomendación de investigación No 1:* Debe prestarse mayor atención al examen de los mecanismos a través de los cuales la complejidad ecológica controla procesos globales.

En el tópico del Cambio Global no se ha prestado suficiente atención a los mecanismos mediante los cuales la complejidad ecológica controla procesos globales. Aspectos claves que influyen en el comporta-

TABLA 1

Tópicos claves de investigación que cruzan a través de las tres áreas prioritarias*

Tópicos claves de investigación

Ejemplos de Preguntas de Investigación:

1. Determinar las causas y consecuencias ecológicas del cambio climático global mediante la cuantificación y el modelaje de las conexiones entre cambio biosférico y global.
 - ¿Cuáles son las diferencias entre biomas y entre especies dentro de biomas, en la regulación de las interacciones entre la biosfera y el dominio abiótico (*i.e.*, la atmósfera, hidrosfera y litósfera)? ¿Cómo afecta la composición comunitaria al funcionamiento del ecosistema?
 - ¿Cómo interactúan los procesos de energía, agua e intercambio de gases, a escalas de dosel o de ecosistemas, con el sistema físico climático?
 - ¿De que manera los efectos directos e indirectos de los cambios en el ambiente físico y químico alteran a las comunidades ecológicas y la dinámica poblacional de las especies componentes?
 - ¿Hasta qué grado los rangos de las especies son determinados por los efectos directos del clima u otros factores físicos en contraposición con las interacciones biológicas?
 - ¿De que manera los cambios de distribución de precipitaciones afectarían la provisión de alimento? ¿Cómo afectaría ello a la dinámica de la población humana?
 - ¿Cómo afecta el cambio climático la dispersión de plantas y animales y a sus habilidades de colonización?
 - ¿Hasta qué grado el registro paleoecológico permite predecir las futuras respuestas ecológicas y evolutivas al cambio global?
2. Determinar las causas y consecuencias ecológicas de cambios en la química de la atmósfera, del suelo, del agua dulce y marina, usando modelos básicos de cómo los sistemas ecológicos regulan la química de la biosfera y modelos para las consecuencias ecológicas de cambios en dichos procesos.
 - ¿Cuáles son las consecuencias del aumento de CO₂ sobre interacciones bióticas en ecosistemas terrestres?
 - ¿Cuál es la relativa sensibilidad de especies de animales y plantas a la contaminación del aire regional?
 - ¿Es el océano un tampón efectivo para elevadas concentraciones atmosféricas de CO₂ y, de ser así, cuáles son las consecuencias de una productividad oceánica acrecentada?
 - ¿Cómo afectan niveles elevados de nutrientes a las interacciones planta-herbívoro? ¿Cómo se transmiten estos cambios a través de niveles tróficos superiores?
 - ¿Cómo son afectadas la composición comunitaria y la diversidad de especies por sustancias tóxicas persistentes?
 - ¿Cómo se ve afectada la susceptibilidad de los seres humanos a enfermedades por la exposición crónica a contaminantes? ¿Cuáles son sus consecuencias sobre las tasas y patrón de transmisión de enfermedades?
3. Determinar las consecuencias ecológicas de cambios en el uso del suelo y el agua a través de la comprensión funcional de cómo la conversión del suelo y la desviación del agua afectan los procesos ecológicos.
 - ¿De qué manera los individuos, poblaciones y ecosistemas responden a

* Los tópicos claves listados en esta tabla han sido derivados de las necesidades de investigación discutidas en los diferentes cuadros en la Sección III. La investigación en cada tópico puede abordar necesidades discutidas en varios cuadros.

- la escala, frecuencia, patrón y tipo de perturbación?
- ¿De qué manera las alteraciones en composición de especies que acompañan a cambios en el uso del suelo afectan las emisiones de gases traza de nitrógeno y carbono a la atmósfera?
 - ¿De qué manera cambios en el uso del suelo y el agua afectan los procesos en cuencas de ríos y otros cuerpos de agua y a las interacciones terrestres-acuáticas?
 - ¿Cuáles son las relaciones entre los patrones de uso del suelo y las distintas medidas de calidad de agua?
 - ¿Cuál es el efecto de la fragmentación del paisaje sobre los patrones de diversidad local y regional?
 - ¿De qué manera los cambios en el uso y la conversión del suelo afectan los procesos biogeoquímicos y las emisiones de gases traza?
 - ¿De qué manera los cambios de uso del suelo afectan la estructura poblacional humana?
 - ¿Qué rol juegan los varios tipos de humedales en la producción de vida silvestre y pesquerías?
4. Determinar las consecuencias evolutivas de los cambios antropogénicos y otros cambios ambientales.
- ¿Bajo qué condiciones deberían evolucionar nuevos genotipos como respuesta a cambios ambientales, incluyendo cambios de clima y nuevos tipos de interacciones entre especies?
 - ¿Cómo cambia la probabilidad relativa de respuesta evolutiva vs. extinción con la tasa de cambio climático?
 - ¿De qué manera los parámetros demográficos de las especies y las interacciones interespecíficas son afectados por cambios evolutivos en tolerancia fisiológica?
 - ¿Cuáles son las consecuencias evolutivas de efectos tóxicos que son edad y estado específicos?
 - ¿Cuáles son las consecuencias ecológicas y evolutivas de la explotación a largo plazo e intensiva de poblaciones naturales?
5. Inventario de patrones de diversidad genética, de especies, de hábitat y de ecosistemas. Determinar la tasa de cambio de diversidad biológica y los efectos subsecuentes sobre la estructura comunitaria y procesos ecosistémicos. Acelerar la investigación sobre factores que determinan diversidad a todos los niveles.
- ¿Cuál es la distribución de especies y tipos de comunidades en el mundo?
 - ¿Cuáles son las tasas de pérdida de diversidad biológica a través de distintos hábitat y grupos taxonómicos?
 - ¿Cuáles son las especies claves, cuya presencia o ausencia pueden alterar en forma crítica la composición de las comunidades locales?
 - ¿Qué procesos son responsables de los patrones de diversidad biológica a lo largo de rangos geográficos extensos? ¿Sirven los patrones de especiación como indicación de estos procesos?
 - ¿De qué manera los atributos de historia de vida, los éxitos reproductivos, la evolución y la genética están acoplados a través de restricciones recíprocas?
6. Acelerar la investigación en biología de especies raras y en declinación y desarrollar la información científica necesaria para preservar poblaciones de especies raras y en declinación potencialmente valiosas.
- ¿Cuáles son las respuestas evolutivas de especies raras a los cambios ambientales y a las estrategias de conservación a largo plazo?
 - ¿Qué factores controlan la dinámica de colonización e invasión de poblaciones en recuperación?
 - ¿De qué manera la biología reproductiva y comportamiento de especies raras responde al estrés?
 - ¿De qué manera la estructura genética afecta las respuestas evolutivas a largo plazo de poblaciones que se están haciendo raras?
 - ¿Qué rol juegan los procesos ecológicos en los compromisos sociales, po-

- líticos y económicos de diferentes estrategias de conservación o manejo?
- ¿Qué características comunes distinguen a especies que han persistido por largos períodos en el pasado?
7. Determinar patrones e indicadores de respuestas ecológicas al estrés que conduzcan hacia las tecnologías necesarias, la condición y estado de sistemas ecológicos, para predecir y evaluar el estrés y seguir la recuperación de sistemas ecológicos dañados.
- ¿Cuáles son los indicadores tempranos de estrés y cuál es la importancia ecológica de cambios en dichos indicadores?
 - ¿Es posible diseñar sistemas modelo para poner a prueba adecuadamente las consecuencias de actividades humanas que sean propuestas?
 - ¿Cuáles son las reglas empíricas para extrapolar desde modelos a sistemas naturales?
8. Acelerar la ciencia básica de restauración de sistemas ecológicos dañados o degradados mediante el desarrollo, evaluación y aplicación de principios de ecología de restauración.
- ¿Cómo está conectada la estructura interna de las comunidades biológicas (e.g., estructura genética, composición o diversidad de especies) con los aspectos funcionales del ecosistema (e.g., productividad, ciclo de nutrientes o incorporación o liberación de contaminantes)?
 - ¿Cómo pueden los principios ecológicos y evolutivos proveer de un marco de orientación para guiar proyectos de restauración?
 - ¿Cuáles son los efectos separados y combinados de los factores físicos y bióticos en la limitación del establecimiento y crecimiento de especies en recuperación en sistemas degradados?
 - ¿De qué manera los atributos de historia de vida de las especies afectan las estructuras poblacional y comunitaria?
- ¿Cuáles son los compromisos sociales y económicos para diferentes opciones de restauración?
 - ¿Bajo qué condiciones es la mitigación una política ecológica defendible?
9. Mejorar, evaluar y aplicar los principios ecológicos para el diseño y uso de sistemas ecológicos sostenibles manejados a escalas apropiadamente grandes.
- ¿De qué manera los factores físicos y las interacciones a nivel comunitario afectan la productividad de poblaciones de especies explotadas?
 - ¿Existe una "combinación mínima" de especies, gremios y formas de vida que resulte en la sustentabilidad de un determinado sistema?
 - ¿Podrán los animales endémicos y microorganismos persistir y participar en sistemas sostenibles compuestos por combinaciones nuevas de especies de plantas?
 - ¿Cuáles son los mecanismos que permiten o previenen la coexistencia de especies?
10. Determinar los principios que gobiernan los brotes y patrones de diseminación de organismos causantes de pestes y enfermedades.
- ¿Cuáles son los efectos de los escenarios de cambio del clima en la redistribución de pestes (incluyendo vectores de enfermedades humanas), en pestes potenciales y en sus organismos hospedadores?
 - ¿Por qué las poblaciones de pestes varían en abundancia, impacto ambiental y susceptibilidad a extinción?
 - ¿Son las combinaciones de múltiples depredadores y las combinaciones múltiples de parásitos más efectivas en el control de las especies blanco que los agentes individuales?

- ¿Cambiarán las especies de depredadores y parásitos a otras especies hospedadoras cuando la población de una especie blanco llega a ser tan baja que la población residual no puede mantenerse?
- ¿Cómo alteran ciertos cambios ambientales específicos (e.g., deforestación, sequía) la transmisión de enfermedades infecciosas en la población humana?

miento de la biosfera en el sistema terrestre son: la diversidad de especies y hábitat, los patrones de distribución de ensamblajes ecológicos y las diferencias en la capacidad productiva y de almacenamiento de diferentes tipos de ecosistemas. Si deseamos comprender los procesos globales, el papel que juega esta complejidad ecológica debe ser incorporado.

* *Recomendación de investigación No 2:* Los nuevos esfuerzos de investigación deben abordar tanto la importancia de la diversidad biológica en el control de procesos ecológicos como el papel que juegan los procesos ecológicos en la estructuración de patrones de diversidad a diferentes escalas de tiempo y espacio.

Gran parte del esfuerzo actual, en el tópico de diversidad biológica, está dedicado a la enumeración de especies en variados hábitat y a la preservación de sitios bióticamente importantes. Estos importantes esfuerzos establecen la base para la investigación aquí propuesta y deben continuar, pero también deben ser considerados otros dos tópicos de vital importancia. Primero, será necesario establecer en qué medida los patrones de diversidad biológica son importantes en la determinación del comportamiento de sistemas ecológicos (e.g., respuestas a cambios climáticos, tasas de flujo de nutrientes, o respuestas a contaminantes). Sólo cuando se conozcan estas relaciones será posible desarrollar estrategias de manejo para la mantención de sistemas ecológicos naturales o dominados por el hombre. Segundo, será necesario entender cómo interactúan los procesos ecológicos con factores físicos y químicos para determinar o controlar la diversidad biológica. Ello requerirá inves-

tigar cómo las especies individuales interactúan y son modificadas por el ambiente abiótico, a escalas de tiempo ecológica y evolutiva.

* *Recomendación de investigación No 3:* Debería establecerse un nuevo y amplio programa integrado de investigación sobre la sustentabilidad de los sistemas ecológicos. Este programa debería enfocarse hacia comprensión de los procesos ecológicos fundamentales de ecosistemas naturales y dominados por el hombre, con el fin de prescribir estrategias de restauración que incrementen la sustentabilidad de los sistemas ecológicos de la Tierra.

La planificación de programas amplios e integrados en áreas del Cambio Global y de la diversidad biológica está más avanzada que aquella relacionada con sistemas ecológicos sustentables. Existen programas de investigación destinados al desarrollo sustentable de recursos naturales específicos (e.g., silvicultura o agricultura sustentable). Sin embargo, los actuales esfuerzos de investigación son inadecuados para tratar con sistemas sustentables de múltiples recursos, múltiples ecosistemas y grandes escalas espaciales. Más aún, gran parte de la investigación actual está enfocada a sistemas manejados basados en bienes de consumo de primera necesidad, prestando poca atención a la sustentabilidad de sistemas naturales cuyos productos y servicios actualmente carecen de valor en el mercado. Abordar el tópico de sistemas ecológicos sustentables requerirá de la integración de las ciencias sociales, físicas y biológicas.

Estas recomendaciones de investigación están dirigidas a ecólogos, a investigadores en disciplinas relacionadas y a agencias de

financiamiento cuyos intereses abarcan una o todas las áreas prioritarias de investigación. Los programas y el financiamiento inmediatos y a largo plazo de la investigación en estas áreas son vitales para el éxito de la SBI.

VI. IMPLEMENTACION: UN PLAN DE ACCION PARA LA SOCIEDAD ECOLOGICA DE AMERICA

La Iniciativa para una Biosfera Sustentable identifica la investigación necesaria para proveer el conocimiento ecológico requerido para una biosfera sustentable. La exitosa implementación de la SBI requerirá de un significativo aumento de la investigación en las tres áreas prioritarias. Su implementación exitosa también requerirá de interacciones interdisciplinarias que conecten a los ecólogos con la amplia comunidad científica, con los medios de comunicación masiva y las organizaciones educacionales, y con los responsables de la toma de decisiones en todos los sectores de la sociedad (Fig. 1). La obtención del conocimiento ecológico necesario para una biosfera sustentable requiere de proyectos interdisciplinarios que implican la colaboración entre ecólogos y científicos de las ciencias naturales y sociales. Además, el logro de una biosfera sustentable requiere de la disseminación y aplicación del conocimiento ecológico.

El logro de los objetivos de la SBI requerirá de actividades separadas y coordinadas de científicos y administradores del ámbito académico, de agencias gubernamentales y organizaciones privadas y del comercio y la industria. En esta sección identificamos las actividades específicas planificadas por la Sociedad Ecológica de América para abordar las recomendaciones de investigación y para dar mayor desarrollo a los componentes educacional y de toma de decisiones ambientales de la SBI. También consideramos las dimensiones internacionales de la SBI y los fondos necesarios para su implementación. Además de estas actividades planificadas por la Sociedad Ecológica de América, la SBI requerirá de acciones complementarias de individuos e instituciones (Fig. 6). Para

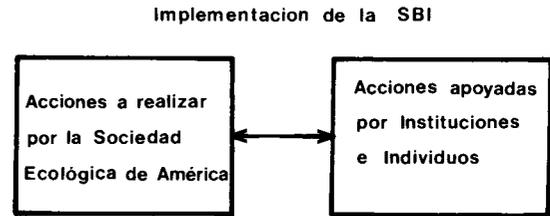


Fig. 6: La implementación de la Iniciativa para una Biosfera Sustentable requerirá de una amplia gama de actividades de muchas organizaciones (ver texto).

abordar los objetivos de la SBI los investigadores principales, administradores de programas en agencias federales, diseñadores de políticas en organizaciones gubernamentales y no-gubernamentales y fundaciones privadas idealmente deben identificar oportunidades especiales en sus esferas de acción.

Investigación

Para la solución de los problemas científicos es crucial que la ciencia moderna conserve un enfoque pluralista. Las oportunidades de investigación aquí descritas demandan nuevas combinaciones de disciplinas científicas y la aplicación y extensión de herramientas de investigación recientemente desarrolladas. Para abordar estas prioridades de investigación en forma más efectiva es importante producir un amplio consenso en la comunidad investigadora, permitiendo a los ecólogos incorporar nuevas ideas y reevaluar las prioridades de investigación.

* *Item de acción No 1:* Durante el próximo año, un comité organizador de la Sociedad Ecológica de América planificará talleres con el objetivo de coordinar la SBI con los esfuerzos actualmente en desarrollo sobre Cambio Global e incrementar la investigación sobre el rol que juega la complejidad ecológica en los procesos globales.

* *Item de acción No 2:* Durante el próximo año, un comité organizador de la Sociedad Ecológica de América planificará talleres con el objetivo de desarro-

llar una iniciativa en diversidad biológica enfocada hacia las causas y consecuencias ecológicas de los patrones de diversidad biológica.

- * *Item de acción No 3:* Durante el próximo año, un comité organizador de la Sociedad Ecológica de América planificará talleres con el objetivo de iniciar un programa amplio e integrado sobre la sustentabilidad de sistemas ecológicos, enfatizando los procesos ecológicos fundamentales que afectan la sustentabilidad de sistemas naturales o manejados.

Para desarrollar proyectos de iniciación inmediata, dichos talleres reunirán a ecólogos con expertos de disciplinas relacionadas de las ciencias sociales y naturales y con los administradores de recursos y los responsables de la toma de decisiones ambientales.

Educación

Las condiciones ambientales que han hecho imperativa la Iniciativa para una Biosfera Sustentable también han demostrado la necesidad de educación ecológica entre los ciudadanos de hoy y del mañana. La comprensión y manejo de la biosfera requiere de información ecológica. Existen muchas estrategias que permiten abordar las necesidades de educación; por ejemplo: trabajar con medios de comunicación masiva con el fin de aumentar la conciencia pública sobre conceptos y problemáticas ecológicas; hacer del aprendizaje ecológico un objetivo de programas de estudios de pregrado; desarrollar programas de postgrado más interdisciplinarios que incluyan los tópicos necesarios para comprender la biosfera. Los ciudadanos con cultura ecológica deberían conocer no sólo los conceptos y principios claves de la ecología, sino que también los procesos básicos mediante los cuales se adquiere el conocimiento ecológico y los mecanismos mediante los cuales interactúan la ciencia y la cultura.

- * *Item de acción No 4:* Durante el próximo año, el Comité de la Agenda de Investigación de la Sociedad Ecológica de América supervisará la preparación y publicación de un documento no-técnico, de educación pública, que explique la importancia que tienen la ecología y la investigación ecológica para la sociedad.

Para abordar las necesidades educacionales de estudiantes, profesores, público en general y de los responsables de la toma de decisiones, se debería utilizar una diversidad de estrategias. Estas incluyen: introducción de la ecología en los programas de educación primaria y secundaria y de entrenamiento de profesores; hacer de la cultura ecológica un objetivo de la educación de pregrado; trabajar con los medios de comunicación masiva para aumentar la percepción de conceptos y problemáticas ambientales. Los esfuerzos educacionales para promover la comprensión ecológica deben establecerse en base a —trabajar con— programas e iniciativas en ciencia y educación ambiental ya existentes. Asimismo, dichos esfuerzos deben ser sistemáticos y sostenidos.

- * *Item de acción No 5:* Durante el próximo año, la Sección Educativa de la Sociedad Ecológica de América desarrollará estrategias sistemáticas, a corto y largo plazo, para incrementar el conocimiento ecológico entre los estudiantes y el público.

La Sociedad Ecológica de América deberá determinar los recursos humanos necesarios para llevar a cabo la investigación ecológica propuesta por la SBI y explotar los mecanismos específicos para abordar las necesidades identificadas, incluyendo fondos de entrenamiento y estímulos de desarrollo profesional. Se requerirá de programas de educación profesional innovativos a niveles de pregrado, graduado y postdoctorado, para romper las barreras sociales e intelectuales a la investigación interdisciplinaria, para facilitar el contacto de los estudiantes con distintos medios bióticos y profesionales,

para introducir a los estudiantes en los avances conceptuales de las subdisciplinas de la ecología y para promover la incorporación de nuevas tecnologías en los programas de investigación emergentes. Finalmente, se requiere de nuevas oportunidades para que los ecólogos establecidos u otros científicos busquen nuevas interacciones, aprendan nuevas técnicas y sinteticen el conocimiento ecológico.

Toma de decisiones ambientales

Miles de decisiones con base ecológica son hechas anualmente por diseñadores de políticas y agencias reguladoras, planificadores del uso del suelo y agua, administradores de recursos, empresas e industrias, firmas consultoras y grupos conservacionistas. Para que la información ecológica sea útil a los que toman decisiones, ésta debe ser tanto accesible como relevante a sus mandatos y responsabilidades. El componente investigación de la SBI está dirigido hacia la adquisición de información ecológica (*i.e.*, enfoques conceptuales, métodos, herramientas y datos) necesaria para evaluar situación que presentan los sistemas ecológicos; para anticipar el impacto de las decisiones de manejo y las opciones de desarrollo; y para conservar, restaurar y manejar sistemas ecológicos. El componente de aplicación de la SBI llama al desarrollo de nuevas estructuras institucionales que harán a la información ecológica más accesible para los responsables de la toma de decisiones. Por ejemplo, los programas colaborativos entre las agencias de manejo y los ecólogos académicos ofrecen beneficios que van más allá de la solución de importantes incógnitas aplicadas. Las agencias se benefician del entusiasmo e ideas innovativas de los estudiantes y postdoctorados; los académicos se ven desafiados por problemas complejos y urgentes. El entrenamiento de estudiantes tanto en dominios básicos como aplicados tendrá beneficios a largo plazo en el desarrollo de la ecología. Aun los proyectos de manejo de gran escala implican experimentos mecanicísticos y estudios de modelos que originan, a corto plazo, publicaciones necesarias para el progreso profesional en el

ámbito académico. Así, la alianza entre ecología básica y aplicada puede vigorizar la ecología académica y reforzar las bases científicas de la evaluación, rehabilitación, conservación y manejo ambientales.

La aplicación del conocimiento ecológico requerirá de una mejor comunicación entre los ecólogos y los responsables de la toma de decisiones en todos los sectores de la sociedad. La transferencia de conocimientos debe ser expedita y deben superarse las barreras interdisciplinarias. La experiencia que poseen las sociedades profesionales orientadas al manejo en el establecimiento de prioridades ambientales será esencial para la apertura de nuevos caminos de comunicación.

* *Item de acción NO 6:* Durante el próximo año un comité organizador de la Sociedad Ecológica de América comenzará a explorar los mecanismos que hagan a los ecólogos más sensibles y los lleven a volcar su experiencia, con mayor compromiso, hacia problemas ambientales críticos. Este comité trabajará en estrecho contacto con sociedades profesionales orientadas al manejo, con administradores de recursos y otros responsables de la toma de decisiones ambientales.

Dimensiones internacionales de la Iniciativa para una biosfera sustentable

El marco de esta Iniciativa ha sido desarrollado en Norteamérica, pero las prioridades de investigación y los problemas ambientales que con ella se relacionan tienen importancia a nivel mundial. Lo que ahora se requiere es la extensión de esta iniciativa a un programa operacional de alcance global.

* *Item de acción NO 7:* Durante el próximo año la Sociedad Ecológica de América organizará una reunión de ecólogos, líderes de numerosas naciones del mundo, para evaluar la SBI y comenzar el proceso de construcción de un marco operacional para la cooperación internacional.

Al mismo tiempo, habrá un esfuerzo para interactuar con organizaciones gubernamentales (e.g., UNESCO) y no-gubernamentales (e.g., ICSU) que poseen programas estrechamente relacionados con la agenda de investigación de la SBI.

Financiamiento de la iniciativa para una biosfera sustentable

La satisfacción de las necesidades financieras de la SBI requerirá de un aumento significativo del financiamiento proveniente tanto de fuentes públicas como privadas. Aunque hay una amplia gama de importantes y gratificantes interrogantes de investigación, la SBI ha identificado aquellas que tienen la más alta prioridad en el desarrollo del conocimiento requerido y su aplicación en la conservación y sabio manejo de los recursos de la Tierra.

Debido a la envergadura de esta iniciativa se requerirá de iniciativas creativas para el financiamiento de la investigación. Habitualmente, las agencias públicas como la National Science Foundation (U.S.) financian investigación básica; las agencias con una misión específica financian investigación que aplican a problemas de su interés particular; las empresas financian investigación que responde a incógnitas imperativas para la industria; y las fundaciones financian tópicos o temas de interés específico. La SBI abarca todos estos objetivos y, como resultado de ello, debe ser planificada y financiada por un rango de agencias y organizaciones.

Las estructuras administrativas actuales son insuficientes para coordinar y financiar el rango de actividades visualizadas por la SBI. Consecuentemente, será necesario desarrollar una nueva estructura administrativa que permita a muchas agencias respaldar el programa integrado de investigación. Para lograr la coordinación y financiamiento debe considerarse una gran variedad de mecanismos, incluyendo comités interagencias nuevos o existentes, un nuevo instituto nacional u otra organización administrativa. Esta nueva organización produciría un mayor desarrollo de las prioridades de investigación dentro de la SBI, coordinaría

estrategias de financiamiento y establecería e implementaría procedimientos para la evaluación del progreso en investigación de la iniciativa.

* *Item de acción No 8:* Durante el próximo año la Sociedad Ecológica de América desarrollará un marco innovativo para coordinar y financiar la SBI. Se pondrá énfasis en el aumento de las oportunidades de investigación gestada por investigadores y sujeta a un sistema de revisión de pares, en el contexto de programas coordinados que financiarían tanto a investigadores individuales como a grupos de trabajo multidisciplinarios.

COMENTARIOS FINALES

La agenda de investigación ecológica propuesta por este documento parte de la base que para resolver muchos problemas ambientales urgentes es necesario mejorar la comprensión de principios ecológicos básicos; continúa con la identificación de tres áreas prioritarias que requieren de intensos esfuerzos de investigación; y concluye con las acciones a ser iniciadas por la Sociedad Ecológica de América, con el fin de reforzar y expandir los esfuerzos de investigación en dichas áreas claves. El éxito de la Iniciativa para una Biosfera Sustentable dependerá de (1) la voluntad de ecólogos individuales para participar en las actividades propuestas, diseminar la visión de la SBI y planificar y ejecutar fases posteriores de la misma y (2) de la visión y habilidades de los diseñadores de políticas, administradores de agencias de financiamiento, representantes gubernamentales, líderes de empresas e industrias, y ciudadanos individuales para apoyar, amplificar y extender las acciones que hemos iniciado. En este momento ni el financiamiento ni la estructura en este país son suficientes para abordar las necesidades de investigación descritas en este documento. Más aún, para el logro de una biosfera sustentable se requiere no sólo adquirir conocimiento ecológico a través de investigación, sino que también de la comunicación de dicha información y co-

nocimiento a todos los ciudadanos y de la incorporación de dicho conocimiento a decisiones ambientales, económicas y políticas. Aunque las barreras para la obtención de dichos objetivos son enormes, el lograr una Biosfera Sustentable es uno de los desafíos más importantes con que se enfrenta hoy la humanidad. El factor tiempo es esencial. Las nuevas tecnologías, la amplia apreciación sobre la magnitud de los problemas ambientales y la creciente apreciación de la importancia que tiene la investigación ecológica básica se combinan para proveer de una oportunidad sin precedentes para hacer progresos significativos hacia la obtención de una biosfera sustentable.

VII. AGRADECIMIENTOS

El Comité agradece a Yaffa Grossman, Mari Jensen, Tara Fuad, Alfreda Thomas, Janice Sand, Jianquo Liu, Patsy Miller y Louise Salmon por su ayuda en las reuniones de Comité y otra asistencia; a Dianne Rowe y Susan Buhler por hacer posible el trabajo diario del Comité y a Sedonia Washington por su paciencia y dedicación en la transcripción y múltiples revisiones del manuscrito.

El comité se complace en agradecer a la Andrew W. Mellon Foundation, a la Ecological Society of America y Oregon State University por su apoyo en el desarrollo conceptual de la Iniciativa para una Biosfera Sustentable (SBI). A la Andrew W. Mellon Foundation, la National Science Foundation, U.S., la Environmental Protection Agency, U.S., la National Aeronautic and Space Administration, U.S. y al Department of Energy, U.S., agradecemos el financiamiento de los costos de publicación.

Comité para una Agenda de Investigación para los Años 90

Los autores de este informe se desempeñaron como miembros del Comité para una Agenda de Investigación para los Años 90 de la Sociedad Ecológica de América. Sus afiliaciones institucionales son las siguientes:

Jane Lubchenco y Annette M. Olson: Department of Zoology, Oregon State University; Linda B. Brubaker: College of Forest Resources, University of Washington; Stephen R. Carpenter: Center for Limnology, University of Wisconsin; Marjorie M. Holland: Public Affairs Office, Ecological Society of America; Stephen P. Hubbel: Department of Biology, Princeton University; Simón A. Levin: Section of

Ecology and Systematics, Cornell University; James A. MacMahon: Department of Biology, Utah State University; Pamela A. Matson: NASA Ames Research Center; Jerry M. Melillo: Ecosystems Center, Marine Biological Laboratory; Harold A. Mooney: Department of Biology, Stanford University; Charles H. Peterson: Institute of Marine Sciences, University of North Carolina; H. Ronald Pulliam: Institute of Ecology, University of Georgia; Leslie A. Real: Department of Biology, University of North Carolina; Philip J. Regal: Department of Zoology, University of Minnesota; Paul G. Risser: Department of Biology, University of New Mexico.

VIII. LITERATURA CITADA

- ALLEN GE & JE BATH (1980) The conceptual and institutional aspects of integrated pest management. *BioScience* 30: 658-664.
- ANDERSON RM (1989) Discussion: ecology of pests and pathogens. In: Roughgarden J, RM May & SA Levin (eds) *Perspectives in Theoretical Ecology*: 348-361. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- ANDERSON RM & RM MAY (1979) The population dynamics of infectious diseases: Part I. *Nature* 280: 361-367.
- ANDREAE MO, A CHAPUIS, B CROS, J FONTAN, G HELAS, C KJUSTICE, YJ KQUAFMAN, A MINGA & D NGANGA (in press) Ozone and aitkin nuclei over equatorial Africa: airborne observations during DE-CAFE 88. *Journal of Geophysical Research*.
- ASHBY WC (1987) Forests. In: Jordan III WR, ME Gilpin & DJ Aber (eds) *Restoration Ecology*: 89-108. Cambridge University Press, Cambridge, England.
- BARRETT GW & R ROSEMBERG, eds (1981) *Stress effects on natural ecosystems*. John Wiley & Sons, N. York.
- BATRA SWT (1982) Biological control in agroecosystems. *Science* 215: 134-139.
- BISHOP JA & LM COOK, eds (1982) *Genetic consequences of man-made changes*. Academic Press, London, England.
- BLAUSTEIN AR & DB WAKE (1990) Declining amphibian populations: a global phenomenon? *Trends in Ecology and Evolution* 5: 203-204.
- BRADSHAW AD (1987) The reclamation of derelict land and the ecology of ecosystems. In: Jordan III WR, ME Gilpin & JD Aber (eds) *Restoration ecology*: 53-74. Cambridge University Press, Cambridge, England.
- BROWN JH (1988) Alternative conservation priorities and practices. *Bulletin of the Ecological Society of America* 69, Abstracts: 84.
- BROWN JH & BA MAURER (1989) Macroecology: the division of food and space among species on continents. *Science* 243: 1145-1150.

- BROWN LR (1989) What does global change mean for society? In: Global change and our common future. Papers from a Forum: 103-124. National Research Council. National Academy Press, Washington D.C.
- BURGESS RL & DM SHARPE, (eds) (1981) Forest island dynamics in man-dominated landscapes. Springer-Verlag, New York, New York.
- CAIRNS Jr. J (1977) Quantification of biological integrity. In: Ballentine RK & LJ Guarraia (eds) The integrity of water: 171-187. Office of Water and Hazardous Materials. United States Environmental Protection Agency, Washington D.C.
- CICERONE RJ & SR OREMLAND (1988) Biogeochemical aspects of atmospheric methane. *Global Biogeochemical Cycles* 2: 299-327.
- COLE J, S FINDLAY & G LOWETT (eds) (1990) Comparative analyses of ecosystems: patterns, mechanisms, and theories. Springer-Verlag, New York, New York.
- COLE LC (1954) The population consequences of life history phenomena. *Quarterly Review of Biology* 29: 103-137.
- COLEMAN DC, (ed) (1989) Ecology, agrosystems, and sustainable agriculture (Special Feature). *Ecology* 70: 1590-1602.
- COLEMAN DC & PF HENDRIX (1988) Agroecosystems processes. In: Pomeroy LR & JJ Alberts (eds) Concepts of ecosystems ecology. *Ecological Studies* 67: 149-170. Springer-Verlag, New York, New York.
- COMMITTEE ON EARTH SCIENCE (1990) Our changing planet: the FY 1991 research plan. United States Global Change Research Program. Office of Science and Technology Policy, Washington D.C.
- COX GW (1984) The linkage of inputs to outputs in agroecosystems. In: Lawrence R, BR Stinner & GJ House (eds) Agricultural ecosystems. Unifying concepts: 187-208. John Wiley & Sons, New York, New York.
- CRAWLEY MJ (1987) What makes a community invulnerable. In: Gray AJ, MJ Crawley & PJ Edwards (eds) Colonization, succession, and stability: 429-453. Blackwell Scientific, Oxford, England.
- DAVIS MB (1986) Climate instability, time lags and community disequilibrium. In: Diamond J & TJ Case (eds) Community ecology: 269-284. Harper & Row, New York, New York.
- DAVIS MB (1989) Insights from paleoecology in climatic change. *Bulletin of the Ecological Society of America* 70: 222-228.
- DETWILER RP & CAS HALL (1988) Tropical forests and the global carbon cycle. *Science* 239: 42-47.
- DI CASTRI F & T YOUNES, eds (1990) Ecosystem function of biological diversity. *Biological International*, Special Issue Number 22.
- DOBSON A, A JOLLY & RUBINSTEIN (1989) The greenhouse effect and biological diversity. *Trends in Ecology and Evolution* 4: 64-68.
- DOUBLEY J (1990) Molecular evidence for gene flow among *Zea* species. *BioScience* 40: 443-448.
- DURHAM WH (1979) Scarcity and survival in Central America: ecological origins of the Soccer War. Stanford University Press, Stanford, California.
- EARTH SYSTEM SCIENCES COMMITTEE (1988) Earth system science: a closer view. A program for global change. National Aeronautics and Space Administration Advisory Council, Washington D.C.
- EDMONSON WT (1991) The uses of ecology: Lake Washington and beyond. University of Washington Press, Seattle.
- ELLSTRAND NC & CA HOFFMAN (1990) Hybridization as an avenue of escape for engineered genes. *BioScience* 40: 438-442.
- ELSWERTH ME, ed (1990) Marine biological diversity: report of a meeting of the marine biological diversity working group. Woods Hole Oceanographic Institute Technical Report WHOI-90-13.
- EWEL JJ (1987) Restoration is the ultimate test of ecological theory. In: Jordan III WR, ME Gilpin & JD Aber (eds) Restoration ecology: 31-33. Cambridge University Press, Cambridge, England.
- FROST TM, DL DeANGELIS, SM BARTELL, DJ HALL & SH HULBERT (1988) Scale in the design and interpretation of aquatic community research. In: Carpenter SR (ed) Complex interactions in lake communities: 229-260. Springer-Verlag, New York, New York.
- GASSER CS & RT FRALEY (1989) Genetically engineering plants for crop improvement. *Science* 244: 1293-1299.
- GLABALLY Y, ed (1989) International global atmospheric chemistry program: a core project of the IGBP. Commission of Atmospheric Chemistry and Global Pollution of the International Association of Meteorology and Atmospheric Chemistry, Albury, Australia.
- GLOBAL OCEAN ECOSYSTEM DYNAMICS (GLOBEC) (1988) Report of a Workshop on global ocean ecosystems dynamics. Joint Oceanographic Institutions Incorporated, Washington D.C.
- GOSELINK JG, EP ODUM & RM POPE (1974) The value of tidal marsh. The Center for Wetlands Research, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana.
- GRAHAM RW (1986) Response of mammalian communities to environmental changes during the late Quaternary. In: Diamond J & TJ Case (eds) Community ecology: 300-313. Harper and Row, New York, New York.
- HASSELL MP, J LATTON & RM MAY (1989) Seeing the wood for the tree: detecting density dependence from existing life-table studies. *Journal of Animal Ecology* 58: 883-892.
- HASSELL MP & RM MAY (1989) The population biology of host-parasite and host-parasitoid associations. In: Roughgarden J, RM May & SA Levin (eds) Perspectives in theoretical ecology: 319-347. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- HAYNES DL, RL TUMMALA & TL ELLIS (1980) Ecosystems management for pests control. *BioScience* 30: 690-696.
- HOFFMAN CA (1990) Ecological risks of genetic engineering in crop plants. *BioScience* 40: 434-437.
- HOKKANEN HMT & D PIMENTEL (1989) New associations in biological control: theory and practice. *Canadian Entomologist* 121: 829-840.
- HOLDGATE MW & MJ WOODMAN, eds (1986) The breakdown and restoration of ecosystems. Plenum, New York, New York.
- HOLLING CS (1988) Temperate forest insect outbreaks, tropical deforestation and migratory birds. *Memoirs of the Entomological Society of Canada* 146: 21-32.
- HOLT RD (1990) The microevolutionary consequences of climate change. *Trends in Ecology and Evolution* 5: 311-315.
- HOUGHTON RA (1990) The global effects of tropical deforestation. *Environmental Science and Technology* 24: 414-423.

- HUEY RB & J KINGSOLVE (1989) Evolution of thermal sensitivity of ectotherm performance. *Trends in Ecology and Evolution* 4: 131-135.
- HOUSTON M, DL DeANGELIS & W POST (1988) New computer models unify ecological theory. *BioScience* 38: 682-691.
- JACOB F (1977) Evolution and tinkering. *Science* 196: 1161-1166.
- JAEGER J (1988) Developing policies for responding to climate change. *World Climate Program Impact Studies*, Stockholm.
- JOINT OCEANOGRAPHIC INSTITUTIONS, Inc. (1990) At the land-sea interface: a call for basic research. *Joint Oceanographic Institutions*, Washington D.C.
- KARR JR (1991) Biological integrity and the goal of environmental legislation: lessons for conservation biology. *Conservation Biology* 4: 1-7.
- KELLER MD, WK BELLOWS & RRL GUILLARD (1989) Dimethyl sulfide production in marine phytoplankton. In: Saltzman ES & WJ Cooper (eds) *Biogenic sulfur in the environment*: 167-182. American Chemical Society, Washington D.C.
- KITCHELL JF, ed (1991) Food web management: a case history of Lake Mendota, Wisconsin. Springer-Verlag, New York, New York.
- KITCHELL JF, SM BARTELL, SR CARPENTER, DJ HALL, DJ McQUEEN, WE NEILL, D SCAVIA & EE WERNER (1988) Epistemology, experiments and pragmatism. In: Carpenter SR (ed) *Complex interactions in lake communities*: 263-280. Springer-Verlag, New York, New York.
- KLINE VM & EA HOWELL (1987) Prairies. In: Jordan III WR, Gilpin ME & JD Aber (eds) *Restoration ecology*: 75-83. Cambridge, England.
- LEVIN SA, MA HARWELL, JR KELLY & KD KIMBALL, eds (1989) *Ecotoxicology: problems and approaches*. Springer-Verlag, New York, New York.
- LIKENS GE, ed (1985) An experimental approach for the study of ecosystems. *Journal of Ecology* 73: 381-396.
- LIKENS GE (1987) Long-term studies in ecology: approaches and alternatives. Springer-Verlag, New York, New York.
- LONG TERM ECOLOGICAL RESEARCH NETWORK OFFICE (LTER) (1990) 1990's global change action plan utilizing a network of ecological research sites. Long Term Ecological Research Network Office, University of Washington, Seattle, Washington, USA.
- LOUDA SM (1988) Insect pests and plant stresses as considerations for revegetation of disturbed ecosystems. In: Cairnes J (ed) *Rehabilitation of damaged ecosystems*: 51-67. CRC, Boca Raton, Florida.
- LUIZAO F, PA MATSON, G LIVINSTON, R LUIZAO & PM VITOUSEK (1989) Nitrous oxide flux following tropical land clearing. *Global Geochemical Cycles* 3: 281-285.
- MATSON PA & SR CARPENTER, eds (1990) Statistical analysis of ecological response to large scale perturbations (Special Feature). *Ecology* 71: 2037-2068.
- MAY RM & RM ANDERSON (1979) The population dynamics of infectious diseases: Part II. *Nature* 280: 455-461.
- McNEELY JA, KR MILLER, WV REID, RA MITTMEIER & TB WERNER (1990) Conserving the world's biological diversity. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, Gland, Switzerland; World Resources Institute, Conservation International, World Wildlife Fund-US, and the World Bank, Washington D.C.
- MOONEY HA, E MEDINA, DW SCHINDER, E-D SCHULZE & BW WALKER, eds. (1991) *Ecosystems experiments*. John Wiley & Sons, Chichester, England.
- MURDOCH WW, J CHESSON & PL CHESSON (1985) Biological control in theory and practice. *American Naturalist* 125: 344-366.
- MURDOCH WW, RF LUCK, SL WALDE, JD REEVE & DS YU (1989) A refuge for red scale under control by *Aphytis*: structural aspects. *Ecology* 70: 1707-1714.
- MYERS JH (1987) Population outbreaks of introduced insects: lesson from the biological control of weeds. In: Barbosa P & JC Schultz (eds) *Insect outbreaks*: 173-193. Academic Press, New York, New York.
- MYERS JH, C HIGGINS & E KOVACS (1989) How many insect species are necessary for the biological control of insects? *Environmental Entomology* 18: 451-454.
- NAIMAN RJ, ed (1988) How animals shape their ecosystems. *BioScience* 38: 750-800.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1986) *Ecological knowledge and environmental-problem solving: concepts and case studies*. National Academy Press, Washington D.C.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1988) *Toward an understanding of global change. Initial priorities for United States contributions to the International Geosphere-Biosphere Program (IGBP)*. National Academy Press, Washington D.C.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1989a) *Alternative agriculture*. National Academy Press, Washington D.C.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1989b) *Evaluation of biodiversity projects*. National Academy Press, Washington D.C.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1989c) *Opportunities in biology*. National Academy Press, Washington D.C. National Academy Press, Washington D.C.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1990) *Forest research: a mandate for change*. National Academy Press, Washington D.C.
- NATIONAL SCIENCE BOARD (1989) *Loss of biological diversity: a global crisis requiring national and international solutions*. National Science Foundation, Washington D.C.
- PARSONS PA (1989) Environmental stresses and conservation of natural populations. *Annual Review of Ecology and Systematics* 20: 29-50.
- PHILLIPS RE, RL BLEVINGS, GW THOMAS, WW FRYE & SH PHILLIPS (1980) No-tillage agriculture. *Science* 208: 1108-1113.
- PIMENTEL D (1977) The ecological basis of insects pest, pathogens and weed problems. In: Cherrett JM & GR Sagar (eds) *Origins of pests, parasite, disease and weed problems*: 1-33. Blackwell Scientific, Oxford, England.
- PIMENTEL D & H HOKKANEN (1989) Alternative for successful biological control in theory and practice. In: Kulhavy DL & MC Miller (eds) *Potential for biological control of *Dendroctonus* and *Ips* bark beetles*: 21-51. Center for Applied Studies, Stephen F. Austin University, Nacogdoches, Texas.
- ROBINOWITZ D, S CARINS & T DILLON (1986) Seven forms of rarity and their influence in the flora of the British Isles. In: Soule ME (ed) *Conservation*

biology: 182-204. Sinauer, Sunderland, Massachusetts.

RAVEN PH (1990) The politics of preserving biodiversity. *BioScience* 40: 769-774.

REGAL PJ (1987) Safe and effective biotechnology: mobilizing scientific expertise. In Fowle III JR (ed) *Application of biotechnology: environmental and policy issues*: 145-164. Westview, Boulder, Colorado.

REGAL PJ, M KLUG, G SAYLOR, J SHAPIRO & J TIEDJE (1989) Basic research needs in microbial ecology for the era of genetic engineering. *FMN*, Santa Barbara, California.

REID WV & KR MILLER (1989) *Keeping options alive: the scientific basis for conserving biodiversity projects*. National Academy Press, Washington D.C.

RIMMER DL (1982) Soil physical conditions reclaimed colliery spoil heaps. *Journal of Soil Science* 33: 567-578.

ROUGHGARDEN J, JH BROWN, E LEHMAN, B MENDELSON & J UNRUH (1989) *In our hands*. Stanford University, Stanford, California.

SCHINDLER DW (1987) Detecting ecosystem response to anthropogenic stress. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 44 (Supplement): 6-25.

SCHNEIDER SH (1988) The greenhouse effect: science and ecology. *Science* 243: 771-782.

SHEARMAN R (1990) The meaning of the ethics of sustainability. *Environmental Management* 14: 1-8.

SHEEHAN PJ, DR MILLER, GC BUTLER & P BORDEAU (1984) *Effects of the pollutants at the ecosystem level*. John Wiley & Sons, New York, New York.

SHUKLA J, C NOBRE & P SELLERS (1990) Amazon deforestation and climatic change. *Science* 247: 1322-1325.

SOULE ME & KA KOHM, eds (1989) *Research priorities for conservation biology*. Island Press, Washington D.C.

STEELE J, S CARPENTER, J COHEN, P DAYTON & R RICKEFS (1989) *Comparison for terrestrial and marine ecological systems*. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Massachusetts.

STRAYER D, JS GLITZENSTEIN, CG JONES, J KOLASA, GE LIKENS, MJ McDONNELL, CG PARKER & STA PICKETT (1986) *Long term ecological studies: an illustrated account of their design, operation and importance to ecology*. Occasional Publication of the Institute of Ecosystem Studies, Number 2, Millbrook, New York, New York.

TIEDJE JM, RK COLWELL, YL GROSSMAN, RE HODSON, RE LENSKI, RN MACK & PJ REGAL (1989) The planned introduction of genetically engineered organisms: ecological consideration and recommendations. *Ecology* 70: 298-315.

TURNER MG, ed (1987) *Landscape heterogeneity and disturbance*. Springer-Verlag, New York, New York.

TURNER RK, ed (1988) *Sustainable environmental management. Principles and practice*. Westview, Boulder, Colorado.

WALTERS C (1986) *Adaptive management of renewable resources*. MacMillan, New York, New York.

WATT AS (1947) Pattern and process in the plant community. *Journal of Ecology* 35: 1-22.

WEIS JS & P WEIS (1989) Tolerance and stress in a polluted environment. *BioScience* 39: 89-95.

WESTMAN WE (1985) *Ecology, impact assessment, and environmental planning*. Wiley-Interscience, New York, New York.

WHALEN RS (1986) *Forests of the future*. In: Crowley JJ (ed) *1986 yearbook of agriculture*: 198-205. United States Department of Agriculture, U.S. Government Printing Office, Washington D.C.

WILSON EO (1990) Threats to biodiversity. In: *Managing planet earth: readings from Scientific American*: 49-60. W.H. Freeman, New York, New York.

WORLD COMMISSION OF ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (1989) *Sustainable development. A guide to our common future*. The Global Tomorrow Coalition, Washington, D.C.

APENDICE A

Problemas ecológicos en los distintos niveles de organización

Aunque muchos de los problemas ecológicos atraviesan todos los niveles de organización biológica, es importante ordenar las interrogantes ecológicas más importantes de acuerdo al nivel apropiado de organización. Al elaborar el siguiente listado de interrogantes ecológicas hemos examinado exhaustivamente el informe del Comité sobre Aplicación de la Teoría Ecológica a Problemas Ambientales (National Research Council 1986).

Niveles de organización tópico ecológico	Interrogantes
---	---------------

Individuos

Morfología funcional	¿Qué factores explican la variación morfológica en y entre especies? ¿Cómo la función sigue a la forma?
----------------------	---

Niveles de organización tópico ecológico	Interrogantes
Ecofisiología	¿De qué manera las limitaciones fisiológicas circunscriben la respuesta de organismos a sus ambientes bióticos y abióticos? ¿Qué es lo que determina los límites fisiológicos de la respuesta de un organismo al estrés?
Ecología conductual	¿Cómo responden los individuos a la información ambiental física, los recursos, los competidores, los depredadores o la pareja?
Factores ontogénicos	¿Qué determina la variación de la respuesta de los organismos en etapas diferentes de su historia de vida?
Variabilidad individual	¿Cómo afecta el genotipo de un individuo a sus interacciones ecológicas? ¿Cuál es la importancia relativa de las variaciones genotípicas y plásticas en la respuesta de los individuos a la variación ambiental?
<i>Poblaciones</i>	
Regulación poblacional	¿Qué procesos tienen el mayor efecto en la tasa de crecimiento de la población? ¿Cuáles de éstos son denso dependientes? ¿Cómo interactúan los procesos denso dependientes con otros procesos importantes?
Estabilidad poblacional	¿Cuál es el patrón de variación temporal del tamaño de la población? ¿Cuándo la densidad de la población es desplazada, tiende ésta a volver a cierto nivel de equilibrio? ¿Existen múltiples puntos de estabilidad? ¿Hay un tamaño mínimo de la población necesario para evitar la extinción?
Dispersión y migración	¿Qué regula la conducta de dispersión y migración de la población? ¿Cómo responde la población? ¿Cómo responde la población a la frecuencia, escala, intensidad, tipo y duración de perturbaciones?
Estructura poblacional	¿Cómo afectan los elementos de la estructura poblacional (i.e., estructura genética y de edad: patrones de variación en atributos de historia de vida, fisiología y plasticidad fenotípica) a las respuestas e interacciones ecológicas de una población?
<i>Entre poblaciones</i>	
Depredación. Parasitismo y enfermedades	¿Hasta qué grado los consumidores o patógenos controlan las poblaciones? ¿Cuál es la importancia relativa de los consumidores o patógenos y

	de los factores extrínsecos (e.g., estrés, perturbación)? ¿Cuál es el rol de las defensas naturales permanentes o inducibles?
Competencia	¿Qué rol juega la competencia en la ecología y en la evolución de la población?
Mutualismo	¿Cómo afectan las interacciones mutualísticas a la respuesta de una población frente a perturbaciones?
Efectos indirectos	¿Cuáles son las interacciones potenciales indirectas en una trama trófica? ¿Cuál es la fuerza relativa de los efectos directos e indirectos? ¿Cómo afectan las interacciones de alto nivel y la no-linearidad de las ecuaciones de interacción a la predictibilidad de la respuesta de poblaciones a perturbaciones?
<i>Comunidades</i>	
Estructura comunitaria	¿Cómo afecta la estructura comunitaria a especies individuales insertas en la comunidad? ¿Hasta qué grado son algunas especies intercambiables sin que ello afecte los procesos comunitarios? ¿Qué nos dicen de su funcionamiento las propiedades colectivas de las comunidades, incluyendo los diversos índices comunitarios? ¿Cómo afecta la dinámica poblacional de las especies componentes a la estructura comunitaria?
Diversidad biótica	¿Cuáles son los patrones, causas y consecuencias de la variación espacial y temporal en diversidad de especies? ¿Cuál es el rol de: la diversidad de composición genética, fenotipos, grupos funcionales, estructura démica, hábitat, paisajes y procesos biogeoquímicos, en las comunidades ecológicas?
Sucesión	¿Cómo se combinan las interacciones poblacionales y otros procesos a nivel de organismos individuales para producir la relativamente predecible secuencia de composición comunitaria durante la colonización o recolonización de un hábitat abierto? ¿Qué procesos retardan o aceleran la velocidad de sucesión en comunidades ecológicas?
Estabilidad comunitaria	¿Cuán adecuadamente resisten las comunidades a las fuerzas ambientales que pueden perturbarlas? ¿Qué propiedades de una comunidad con-

Niveles de organización tópico ecológico	Interrogantes
<i>Ecosistemas</i>	<p>ducen a elasticidad frente al cambio ambiental? ¿Cuán rápido retornan las comunidades a su estado inicial y qué factores determinan la velocidad de recuperación? ¿Hasta qué grado son las comunidades resistentes a la invasión de especies exóticas? ¿Cómo podríamos predecir la habilidad de una especie nueva para llegar a establecerse en una determinada comunidad?</p>
Flujo de energía y materia	<p>¿Cómo afecta la variación de los flujos de energía y materiales a la estructura del ecosistema? ¿Qué mecanismos dan cuenta del flujo de energía y materia dentro de un ecosistema? ¿Cómo interaccionan la disponibilidad de recursos con otros factores bióticos y abióticos limitantes en su influencia sobre el ciclo biogeoquímico?</p>
Indices de diagnóstico de función	<p>¿Qué características del ecosistema sirven como índice de estrés o "salud" del mismo?</p>
Comparación entre sistemas	<p>¿Cómo difieren en estructura, función y respuesta a las perturbaciones o al manejo los ecosistemas? ¿Cómo interviene el clima en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas?</p>
Intervención de ecosistema en el clima, desechos	<p>¿Cómo intervienen en el clima los ecosistemas? ¿Cuál es el rol de un determinado ecosistema en el procedimiento o incorporación de desechos antropogénicos?</p>
<i>Entre ecosistemas</i>	
Ecología del paisaje	<p>¿Cómo influyen los patrones de uso del suelo en la ecología de los componentes del sistema, incluyendo todos los niveles de organización ecológica hasta el eslabón más elevado del paisaje mismo?</p>
Respuesta a cambios	<p>¿Cuál es la retroalimentación entre procesos del ecosistema y atmosféricos, y además en y entre ecosistemas separados que se extienden a una escala global? ¿Cómo afecta la vegetación al clima? ¿Cuál es la respuesta de los ecosistemas terrestres, acuáticos y marinos a la variación de CO₂? ¿Cuáles son los efectos de: los cambios climáticos, la composición atmosférica, el nivel del mar, la circulación oceánica y la radiación ultravioleta en los procesos de los ecosistemas, incluyendo el ciclo biogeoquímico?</p>

APENDICE B

Un corte a través de temáticas *ecológicas*

Unas pocas temáticas ecológicas son comunes a muchas interrogantes ecológicas específicas. Esta lista identifica temáticas críticas para aclarar procesos ecológicos y aumentar la utilidad de la ecología para resolver problemas ambientales prácticos.

Interacciones entre niveles de organización ecológica. Virtualmente, todas las interrogantes ecológicas exploran cómo se relacionan los fenómenos que ocurren a un determinado nivel con procesos que operan a otros niveles. Aunque no haya sido explícitamente identificada, esta problemática puede ser considerada en la mayoría de las investigaciones ecológicas. Por ejemplo, respuestas a nivel de poblaciones, comunidades y ecosistemas deben ser relacionadas con procesos a nivel de los organismos individuales, nivel en el cual actúa la selección natural.

Los efectos de escalas temporales y espaciales. Los procesos y eventos en una determinada escala de espacio y tiempo tienen serias implicaciones para, y pueden incluso controlar, procesos y patrones a otras escalas. Por ejemplo, la competencia intensiva por un recurso limitado puede ocurrir muy rara vez, pero impone muchas características de las especies competidoras por un largo período de tiempo.

La importancia de la heterogeneidad o diversidad en todos los niveles de la organización ecológica. Aquí incluimos interrogantes concernientes al rol de la diversidad genética, la diversidad de especies y la heterogeneidad de hábitat en numerosas escalas anidadas, la complejidad de escala a nivel del paisaje y muchos otros aspectos de los sistemas ecológicos. Por ejemplo, la existencia de "parches" y la heterogeneidad del ambiente pueden afectar la evolución de la historia de vida. La coexistencia de las

especies y la mantención de los procesos de los ecosistemas.

¿Cómo se combinan múltiples factores para afectar los sistemas ecológicos? Es crítico evaluar el impacto acumulativo de numerosos factores a todos los niveles de organización ecológica. Los factores físicos y biológicos interactúan para influenciar los procesos ecológicos; una mejor comprensión de estas interacciones ayudará a abordar problemas mayores. Por ejemplo, los organismos ya presionados por hacinamiento y por las consecuencias de la intensa competencia por recursos son a menudo más susceptibles a la mortalidad cuando son sometidos a presiones adicionales. Múltiples disciplinas deben ser incorporadas a la investigación ecológica como un medio para comprender cómo se combinan los múltiples factores. Es crítico para el desarrollo de la ciencia ecológica comprender el rol de los procesos atmosféricos, la geoquímica en los suelos y la física de la transferencia de materia, calor y momentum en el agua.

El rol de la variabilidad ambiental. La teoría ecológica, al igual que el estudio empírico, han demostrado las grandes diferencias entre sistemas en equilibrio y sistemas en situación de no equilibrio. Consecuentemente, las prioridades en investigación ecológica incluyen la magnitud y la acción específica de perturbaciones naturales y antropogénicas y la interacción de las perturbaciones con otros factores bióticos y abióticos. Dicha investigación incluye la problemática de la respuesta ecológica, el estrés ambiental y la interrogante de cómo la estructura y la función de sistemas ecológicos, a todos los niveles, manifiestan el estrés. Implícito en este problema general está también la interrogante de cómo detectar cambios en sistemas ecológicos contra un telón de fondo de considerable variabilidad.

APENDICE C

Lista de cuadros

Cuadro N ^o	Título	Página N ^o
1	Causas y consecuencias ecológicas del cambio climático global	192
2	Causas y consecuencias ecológicas directas de cambios en la química de la atmósfera, del suelo y del agua dulce y marina	193
3	Consecuencias ecológicas de cambios en el uso del suelo y el agua	194
4	Inventario biológico	197
5	La biología de especies raras y en declinación	198
6	Efectos del cambio global y regional sobre la diversidad biológica	199
7	Indicadores de la respuesta ecológica al estrés	202
8	Restauración de sistemas ecológicos	203
9	Desarrollo y aplicación de la teoría ecológica al manejo de sistemas ecológicos	204
10	Especies introducidas, pestes y patógenos	205
11	La ecología de la propagación de enfermedades	206
12	Procesos ecológicos y poblaciones humanas	206