

UNA MIRADA AL ESTADO DEL SISTEMA TERRESTRE. ¿QUÉ SABEMOS SOBRE EL CAMBIO GLOBAL?

ANTONIO CENDRERO UCEDA
Real Academia de Ciencias

INTRODUCCIÓN

Como es bien conocido, la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CNUMAD), celebrada en 1992 en Rio de Janeiro, constituyó un importante punto de inflexión en las reflexiones sobre la sustentabilidad de las pautas de desarrollo imperantes en el planeta, a la luz de los cambios que se están produciendo en éste.

El concepto de desarrollo sostenible («desarrollo que permita cubrir las necesidades actuales sin dañar el medio ambiente ni poner en peligro las necesidades de generaciones futuras») había sido formulado con anterioridad, pero se puede considerar que es a partir de la publicación del conocido «informe Brundtland», en 1986, y a la posterior celebración de la Conferencia de Rio a la que dio lugar, cuando ese concepto adquiere notoriedad general y es ampliamente aceptado como principio u objetivo por parte de organismos internacionales, gobiernos y público en general. La preocupación respecto a la sustentabilidad de las actividades humanas surge fundamentalmente de la constatación de que éstas están produciendo en los sistemas naturales una serie de cambios cualitativos y cuantitativos importantes que están afectando al funcionamiento del planeta en su conjunto.

Como muestra de la preocupación de la comunidad científica internacional ante estos cambios puede mencionarse la declaración que con motivo de la CNUMAD suscribieron científicos de 70 países, incluyendo 102 Premios Nobel: «Nuestra masiva interferencia con el interdependiente entramado de la vida sobre la Tierra –unida al deterioro ambiental causado por deforestación, pérdida de especies y cambio climático– podría desencadenar efectos adversos generalizados, incluyendo colapsos impredecibles de sistemas naturales esenciales, cuyas interacciones y dinámica comprendemos de manera imperfecta. La incertidumbre sobre la extensión de esos efectos [...]. La cita extraída de esa declaración incluye dos conceptos que, a mi juicio, son fundamentales en relación con este tipo de análisis: *a)* la constatación de que se están produciendo cambios significativos en el planeta, y *b)* las dudas respecto a la magnitud y consecuencias de los mismos.

La CNUMAD produjo una serie de resultados, en forma de acuerdos o de programas internacionales, cuyos grado de cumplimiento y eficacia no se van a comentar aquí. Entre esos resultados cabe citar acuerdos tales como los relativos a la biodiversidad o al clima y, muy especialmente, la «Agenda 21». Esta *Agenda* constituye un ambicioso programa de actuación para los organismos internacionales, especialmente los del sistema de Naciones Unidas, así como para los gobiernos y organizaciones no gubernamentales. Consta de cuatro grandes apartados, el último de los cuales se dedica a los medios necesarios para la ejecución del programa propuesto. En este apartado, el capítulo 35 sobre «Ciencia y Desarrollo Sostenible», señala el papel fundamental que la Ciencia debe representar en la superación de la brecha existente en la disponibilidad de datos y en nuestros conocimientos sobre el funcionamiento, estado y tendencias de cambio de los sistemas naturales; ese conocimiento y esos datos son esenciales para poder tomar medidas correctivas y, muy especialmente, preventivas de los procesos de deterioro existentes.

Una de las consecuencias de la situación descrita fue la publicación, en 1995, del «Informe de Naciones Unidas sobre Ciencia y Desarrollo Sostenible». Este informe insiste en el papel fundamental de la Ciencia para alcanzar un desarrollo sostenible y en la necesidad de que la comunidad científica responda a los nuevos desafíos que esto representa. En concreto, señala la necesidad de incrementar las investigaciones sobre temas tales como:

- Cambio climático y sus consecuencias.
- Evolución demográfica.
- Degrado ambiental.
- Tasas de consumo de los recursos naturales.
- Evaluación de los efectos de las actividades humanas sobre los sistemas naturales.
- Procedimientos de análisis sobre el estado del medio ambiente y de predicción a medio y largo plazo.

Como consecuencia de lo anterior, han surgido una serie de iniciativas o se han intensificado otras ya existentes,

encaminadas a compendiar la información de que se dispone sobre el estado de los sistemas naturales en el planeta y a realizar diagnósticos sobre la condición en que se encuentran y las tendencias de cambio que muestran. Algunas de esas iniciativas se comentan más adelante.

CAMBIO GLOBAL ES MUCHO MÁS QUE CAMBIO CLIMÁTICO

Si bien la opinión pública en general está familiarizada con el problema del cambio climático, lo está mucho menos con el concepto de cambio global, o tiende a considerar ambos como sinónimos. Es indudable que existe una relación entre ambos conceptos, pero también que los cambios globales van mucho más lejos que las modificaciones que pueda estar experimentando el clima. La interdependencia entre el cambio climático y otros cambios que afectan al planeta es estrecha y no siempre está claro cuál es la causa y cuál el efecto.

Para obtener una percepción clara de la naturaleza de las modificaciones que se están produciendo en el conjunto de los sistemas terrestres es necesario, en primer lugar, disponer de una imagen del estado actual de dichos sistemas y de las tendencias de cambio que presentan. Eso es precisamente lo que intenta presentar el primer análisis que a escala global se ha realizado por parte del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), recogido en el *Global Environment Outlook* (GEO), que podría traducirse como: «Perspectiva del Medio Ambiente Global». El propio título de la obra sugiere ya que el alcance de la misma es limitado; no tiene la pretensión de ser un análisis, una evaluación o un diagnóstico del estado del medio ambiente equivalente a los que, a escala nacional, realizan muchos países cuando publican sus *S.O.E. Reports* (Informes sobre el Estado del Medio Ambiente), ya que la información disponible a escala mundial no lo permite. Sus miras son más modestas y simplemente se plantea ofrecer una «mirada», una «perspectiva» que proporcione una cierta imagen de la situación. A pesar de esas limitaciones, resulta de gran interés, pues sirve para identificar toda una serie de problemas que surgen como consecuencia de los cambios que están afectando a los distintos componentes del medio ambiente global.

Este informe considera una serie de componentes del medio o ecosistemas que constituyen áreas de atención y preocupación y para los cuales se resumen a continuación los principales problemas detectados.

Tierras

Hay una reducción apreciable de terrenos adecuados para producir alimentos; este problema es especialmente importante en África y en los países de la zona Asia-Pacífico, donde se percibe de manera más acusada la degradación de las tierras como consecuencia de prácticas de gestión poco adecuadas. Los principales cambios que afec-

tan a las tierras se manifiestan en el incremento de problemas tales como encharcamiento, salinización, erosión, pérdida de nutrientes, desertización; otros cambios importantes son los relativos al uso del territorio, con ocupación creciente de tierras marginales y espacios relativamente vírgenes, lo que implica destrucción o fragmentación de ecosistemas.

Bosques

El principal cambio que afecta a los bosques es la reducción de su extensión, si bien los datos sobre este punto deben tomarse con cautela, ya que son bastante poco precisos para amplias zonas del planeta. Con los datos disponibles, parece que hay un declive considerable en la superficie ocupada por bosques naturales en la mayoría de los países en vías de desarrollo, especialmente en América Latina, Caribe, África y Asia-Pacífico. Las causas principales de este declive son la expansión de la frontera agrícola, la explotación maderera, la creación de nuevos asentamientos humanos y la extensión de los ya existentes. La deforestación está ocasionando, sobre todo en África, pérdidas apreciables de productividad, así como una mayor variabilidad climática y un aumento del riesgo de inundaciones.

Biodiversidad

La desaparición de especies y la reducción de la biodiversidad es motivo de preocupación en todas las regiones del mundo, si bien parece ser un problema particularmente acusado en el caso de Iberoamérica. Las pérdidas de biodiversidad se originan sobre todo por los cambios de uso del territorio, con la consiguiente destrucción o fragmentación de hábitats, la falta de corredores biológicos, la sobreexplotación de acuíferos y la sobrepesca.

Aqua

Los cambios que dan lugar a los mayores problemas son, como era lógico esperar, los que afectan a la pérdida de calidad de las aguas y a la disponibilidad de cantidades adecuadas de las mismas para los diferentes usos; esa disponibilidad es particularmente irregular en el África subsahariana, Asia Occidental-Oriente Medio y en los grandes centros urbanos de Iberoamérica. Prácticamente en todo el mundo se sufren cambios de composición en las aguas (subterráneas y superficiales) por una creciente contaminación por agroquímicos y residuos urbanos. La sobreexplotación de acuíferos y de las aguas superficiales es también motivo de preocupación.

Mares y costas

La sobreexplotación de pesquerías está dando lugar a importantes reducciones de los recursos pesqueros, que tienen carácter grave en Norteamérica, Europa y Asia-Pa-

cífico. La degradación del litoral amenaza a un tercio de las costas mundiales, especialmente en Europa, donde esta cifra llega al 70 %. Distintos tipos de actividades humanas en las cuencas fluviales están produciendo aumentos de las tasas de erosión, que pueden cifrarse en varios órdenes de magnitud y que llevan aparejado un importante aumento de la sedimentación en zonas litorales; también aumenta en casi todo el mundo la aportación de contaminantes a la costa a través de los ríos, con el consiguiente cambio de composición en las aguas litorales. Asimismo, parece que el cambio climático puede estar afectando a las pautas de circulación oceánica y a la productividad de los mares. El aumento del nivel del mar representa un grave riesgo para toda una serie de islas pequeñas y costas bajas, principalmente en Asia sudoriental, Pacífico, Caribe y Europa.

Atmósfera

La contaminación del aire está dando lugar a un cambio cualitativo en la composición de la atmósfera, que constituye un problema grave en Europa oriental y en las grandes áreas urbanas de América del Norte y del Sur y de la región Asia-Pacífico. Las precipitaciones ácidas van en aumento y constituyen una preocupación seria en Europa y Norteamérica, así como en Asia-Pacífico y Sudamérica.

A pesar de los acuerdos establecidos y de las medidas adoptadas en algunos países, se sigue produciendo una disminución del ozono estratosférico y un aumento del mismo en la troposfera. Igualmente se detecta que continúa aumentando el contenido de gases de efecto invernadero

en la atmósfera, con su consiguiente efecto de calentamiento del clima.

Medio urbano-industrial

En el momento actual, más de la mitad de la población mundial habita en centros urbanos, y la tendencia es a un rápido aumento de esta proporción. El crecimiento de las concentraciones humanas –y las actividades directa o indirectamente relacionadas con ellas– es uno de los factores principales de modificación de toda una serie de características y procesos de la superficie terrestre. Esas concentraciones también dan lugar a mayores tasas de producción de residuos *per capita*, con los consiguientes aumentos de la contaminación de aire, agua y suelo, que ocasionan un agravamiento de los problemas de salud. Se ha detectado un aumento de las emergencias ambientales por contaminantes químicos. Este problema es especialmente grave en los grandes centros urbanos de Asia-Pacífico, Europa oriental, Latinoamérica y África.

Zonas polares

Estas zonas son las mayores áreas casi vírgenes que quedan, y constituyen importantes indicadores de la salud global del planeta, especialmente en lo que se refiere al calentamiento global y al transporte de contaminantes a distancia. A pesar de su escasa población y de su relativo buen estado de conservación, se advierte que minería, sobrepesca, explotación forestal y construcción de infraestructuras representan amenazas crecientes de deterioro en las regiones árticas.

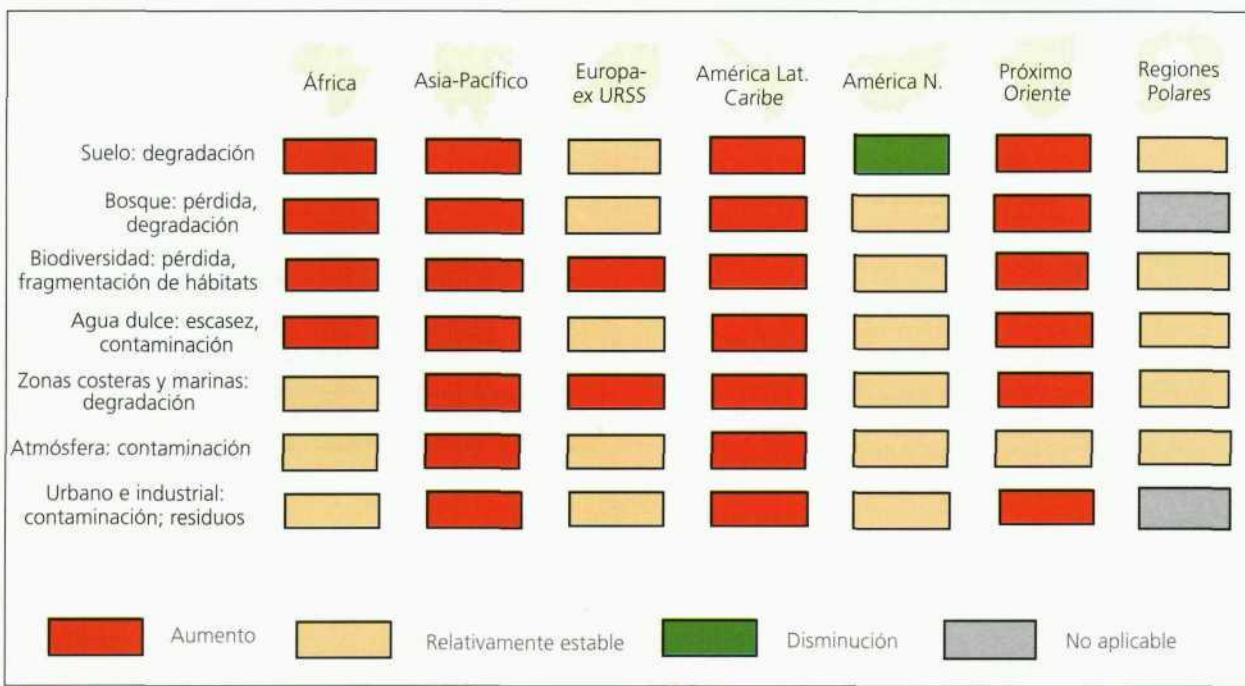


Fig. 1.– Tendencias de cambio con respecto a los principales problemas ambientales en las distintas regiones del mundo, según el *Global Environment Outlook* (GEO), 1997.

Algunos hechos sobresalientes

A continuación se resaltan algunos datos significativos que pueden extraerse del GEO, y que dan una idea de algunas de las manifestaciones del cambio global y de sus consecuencias. En la figura 1 se muestran las tendencias que se observan en las distintas partes del mundo, en relación con los principales cambios comentados; las figuras 2-5 presentan ejemplos relativos a la situación en ciertas regiones.

- La degradación de zonas áridas amenaza a un millardo (1000×10^6) de personas en 110 países (figura 2).

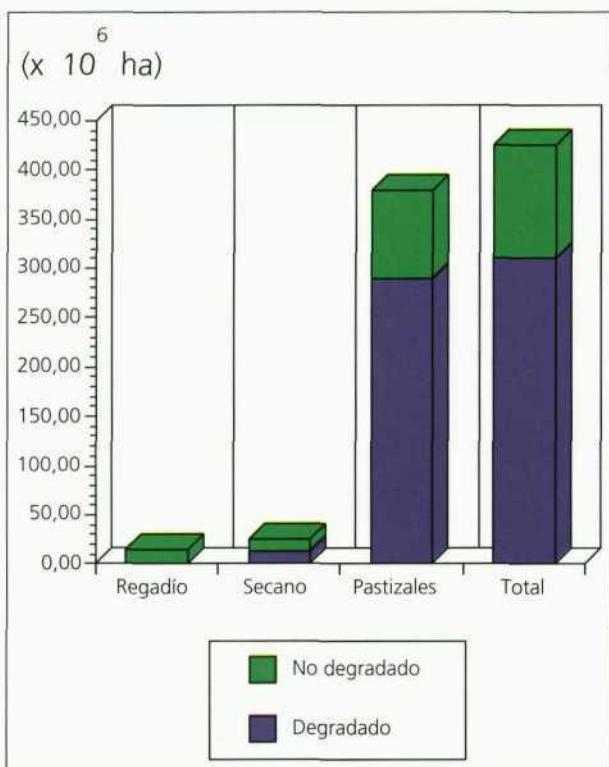


Fig. 2.- Desertificación y degradación de tierras agrícolas de zonas semiáridas de América del sur (GEO 97).

- Los bosques de los países en vías de desarrollo decrecieron un 8% en el período 1980-90 (figura 3).
- No se dispone de evaluaciones fiables del estado de la biodiversidad en las distintas regiones del planeta; se estima que existen unos 13 millones de especies, de las cuales están descritas un 13% (figura 4).
- 1,7 millones de personas no disponen de agua de calidad adecuada; 25.000 personas mueren diariamente por uso de agua insalubre.
- 1,5 millones de personas dependen del agua subterránea para su abastecimiento. La explotación de acuíferos en zonas urbanas costeras está causando problemas de salinización y de subsidencia. Se considera

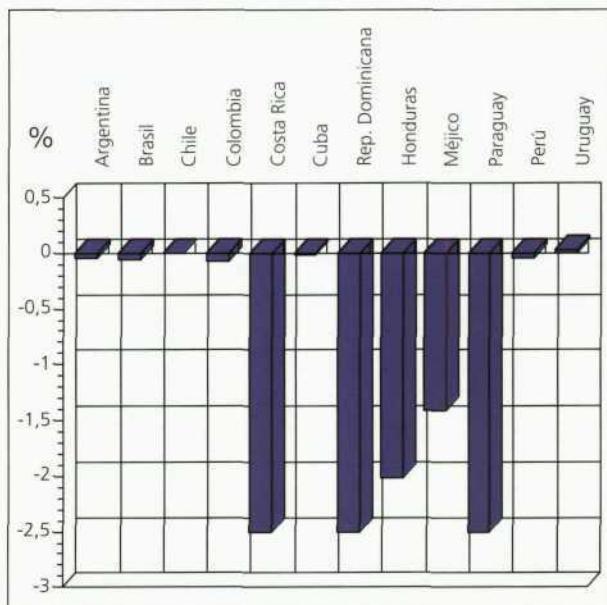


Fig. 3.- Tasas anuales de variación de la extensión de bosques en algunos países de Iberoamérica para el período 1981-90 (GEO 97).

que en el futuro inmediato el agua será un factor limitante de gran importancia para el desarrollo de ciertas regiones.

- El 60% de la población mundial vive a menos de 100 km de la costa, con una tendencia de concentración creciente: el 33% de las costas se encuentran

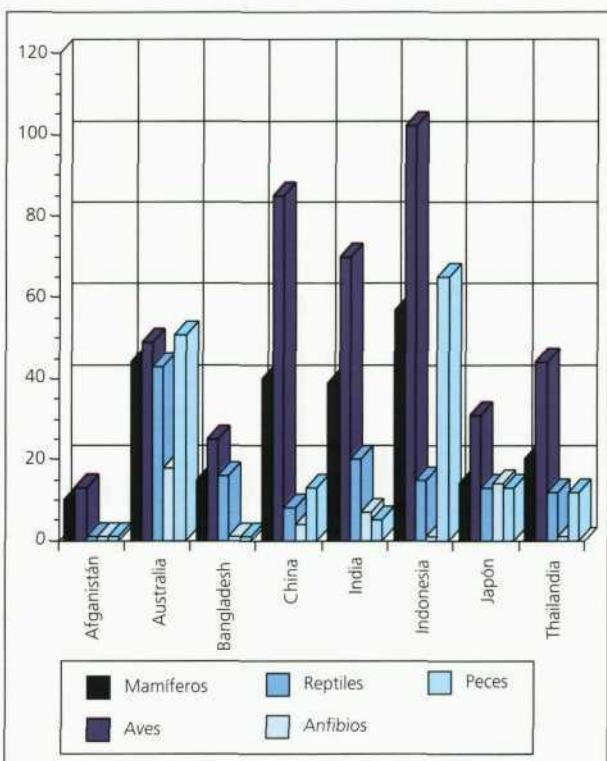


Fig. 4.- Número de especies animales amenazadas en algunos países de la región Asia-Pacífico (GEO 97).

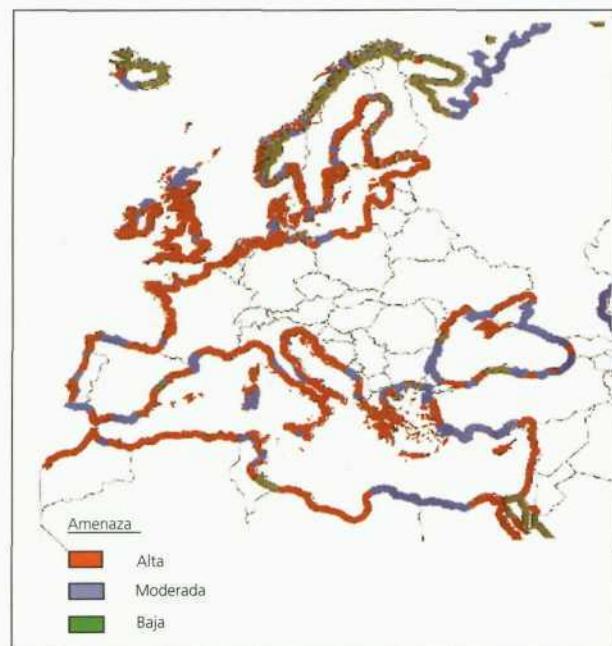


Fig. 5.- Zonas costeras amenazadas por distintas actividades humanas (GEO 97).

degradadas o gravemente amenazadas; esta proporción es de 70-80% en Europa y Asia-Pacífico (figura 5).

- Más del 60% de los caladeros sufre sobrepesca.
- A pesar de los acuerdos internacionales, la degradación de la capa de ozono avanza más rápidamente de lo esperado.
- El aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, el calentamiento global y el aumento del nivel del mar son preocupaciones generalizadas (figura 6); las previsiones de aumento del consumo energético (principal causa de la producción de gases de efecto invernadero) para 2010 son del 100% en Asia y del 50-75% en Iberoamérica.

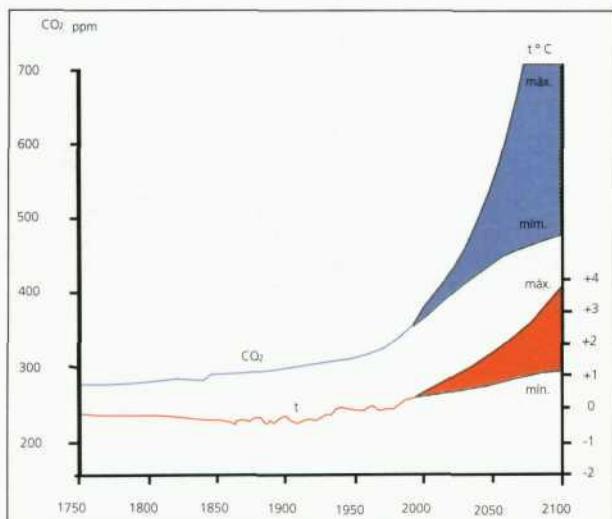


Fig. 6.- Variación pasada y proyecciones de los contenidos de dióxido de carbono y temperatura media en la atmósfera (IPCC, 1998).

- Se aprecia que continúan aumentando las concentraciones de contaminantes en la atmósfera, así como los problemas de acidificación y de contaminación transfronteriza.

Conclusiones iniciales, tendencias y prioridades de actuación

A pesar del carácter de «examen» o «mirada» del GEO, sin pretensiones de constituir una evaluación rigurosa del estado del planeta, sí permite extraer algunas conclusiones iniciales de interés en lo que se refiere a las consecuencias que para los seres humanos y sus actividades tienen las tendencias de cambio descritas.

- Es necesario analizar de manera más profunda las interacciones clima-tierra-agua-biodiversidad y sus interrelaciones con los aspectos sociales, económicos, culturales e institucionales.
- A pesar del descenso de las tasas de natalidad, las pautas de producción y consumo existentes ocasionan el despilfarro de recursos, el aumento de los residuos y de la contaminación y la reducción de hábitats y de la biodiversidad.
- Si no cambian las pautas del consumo de energía, aumentarán las emisiones de CO₂, SO_x y NO_x; es necesario establecer en un futuro próximo planes de adaptación al cambio climático.
- La expansión de zonas urbanas y la degradación de tierras por una mala gestión agrícola pueden acarrear una escasez de tierras cultivables y de agua que impidan el desarrollo en varias regiones.
- La expansión de actividades agrícolas en zonas marginales también está reduciendo los hábitats y la biodiversidad.

¿Qué tendencias de cambio pueden deducirse para el futuro? Nuevamente, con las reservas antes indicadas por la naturaleza de este primer informe, se pueden señalar las siguientes:

- El uso actual de una serie de recursos consumibles y no consumibles (tierras, agua, bosques, pesquerías, costas, aire urbano) supera su capacidad de regeneración y no es sostenible.
- Las tasas de emisión de gases de efecto invernadero superan los objetivos de estabilización acordados internacionalmente.
- Las zonas naturales y la biodiversidad continúan decreciendo, a causa sobre todo de la expansión urbana y de las actividades agrícolas.
- El uso generalizado y creciente de sustancias químicas está aumentando los problemas de producción de residuos y de contaminación, y causa riesgos serios para la salud.
- El actual desarrollo del sector energético no es sostenible.



Fig. 7.- Esquema simplificado de las relaciones entre aumento de la población, presiones sobre el medio y efectos sobre ciertos componentes del medio ambiente.

- La urbanización no planificada de zonas costeras amenaza gravemente a los ecosistemas litorales.
- La alteración de los ciclos biogeoquímicos está dando lugar a acidificación, variabilidad climática, cambios en los ciclos hidrológicos y pérdidas de biodiversidad, biomasa y productividad.
- Lo anterior está causando problemas socioeconómicos, tales como aumento de las desigualdades, pobreza y hambruna.

- Eficiencia energética y energías renovables.
- Aplicación a nivel global de tecnologías ambientalmente adecuadas.

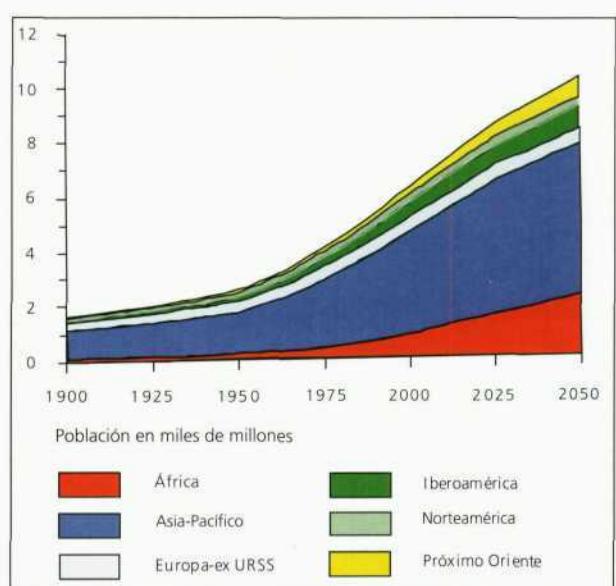
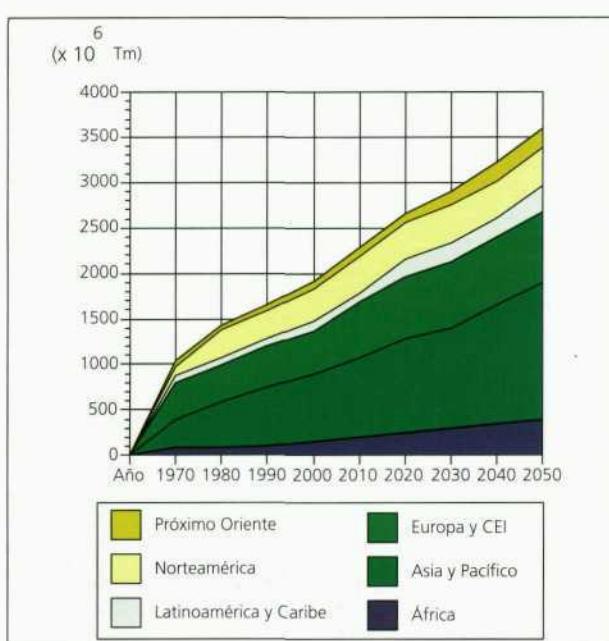
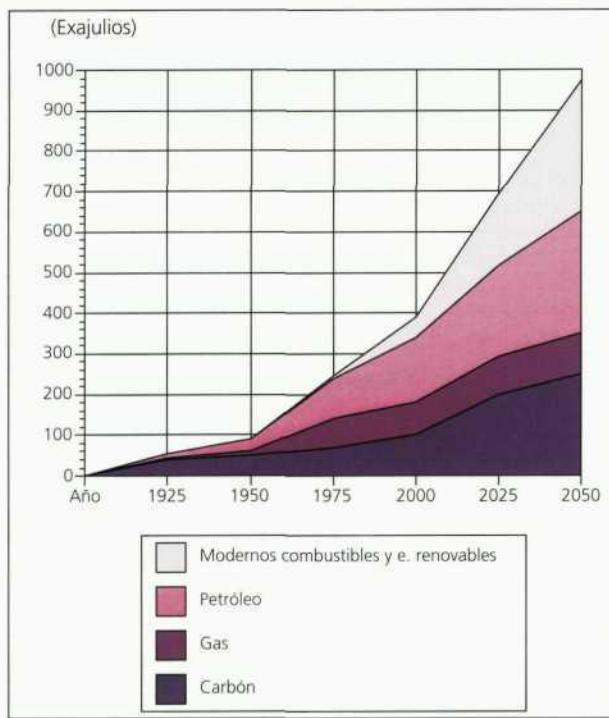


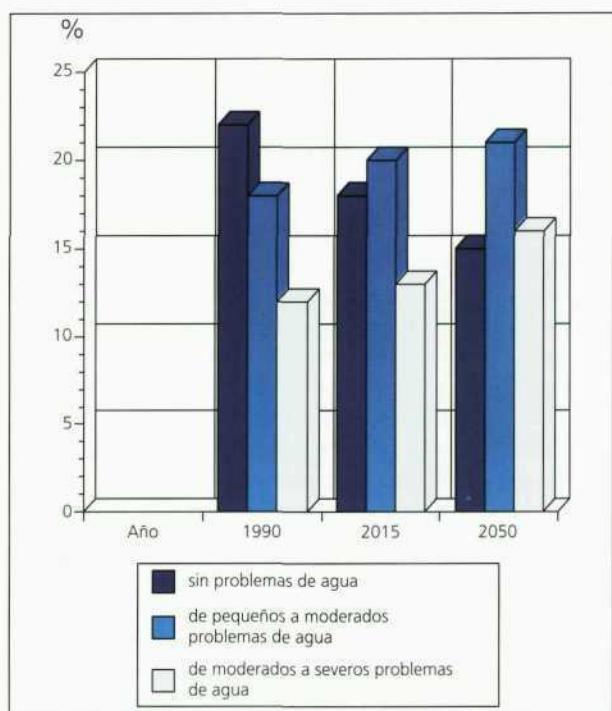
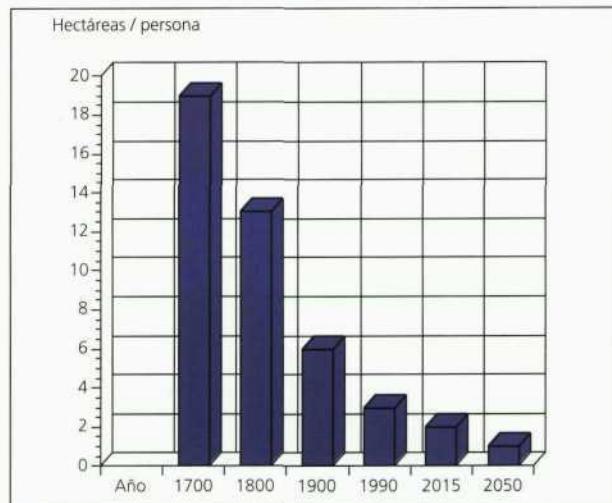
Fig. 8.- Aumento de la población; tendencias recientes y previstas (GEO 97).

La relación que existe entre los cambios y problemas descritos y el aumento de la población y del consumo *per capita* de todo tipo de recursos se ilustra de forma muy esquemática y simplificada en la figura 7. Las figuras 8-12 presentan algunos datos sobre tendencias pasadas y proyecciones relativas a algunos de los factores clave que se deben considerar (población, consumo energético, producción de alimentos, disponibilidad de terrenos «vírgenes», disponibilidad de agua); la figura 6 presenta los datos relativos a la emisión de gases de efecto invernadero y sus consecuencias para la temperatura global.

A la vista de lo comentado anteriormente, el GEO propone, entre otras, las siguientes líneas prioritarias de actuación (se detalla en mayor medida aquellas que tienen relación con el papel de la ciencia):



- Acción global sobre el agua dulce («verde» o de abastecimiento, «marrón» o residual, «azul» o de uso creativo).
- Observación, seguimiento y evaluación del estado del medio:
 - nuevos y mejores métodos de toma de datos, armonización de bases de datos, bases globales;



- mejora de la comprensión de las interacciones entre medio ambiente y desarrollo;
- aumento de la capacidad de evaluación integrada y de predicción;
- mejor traducción de los resultados científicos para su comunicación a tomadores de decisiones y público en general;
- desarrollo de procedimientos eficientes y útiles para el seguimiento del estado del medio ambiente y de los impactos de las políticas y actuaciones a escala local, nacional y global.

Es de destacar que, según el GEO, dedicando el 2% del Producto Bruto Mundial a educación, protección y restauración ambientales se podrían producir grandes avances para corregir las negativas tendencias de cambio descritas más arriba.

Otros análisis

Una evaluación llevada a cabo de forma independiente, con motivo de los cinco años transcurridos desde la Conferencia de Río de Janeiro, llegó también a conclusiones poco optimistas respecto a los cambios observados durante la presente década. Dicho estudio constata, por ejemplo, que desde finales de los años ochenta se ha producido una disminución de alrededor del 75% de las emisiones de CFCs, pero que, sin embargo, se ha seguido produciendo un deterioro de la capa de ozono. Igualmente se detecta que, con excepción de algunos países, siguen aumentando las emisiones de CO₂, especialmente en los países en vías de desarrollo. La disminución de la extensión de bosque en el período 1990-1995 oscila entre 6,1% en los bosques tropicales de América Central y del Norte y 2,7% en los de América del Sur; no obstante, se han producido ligeros aumentos (inferiores al 1%) en los bosques templados de Norteamérica y Europa.

Pasando del ámbito global al europeo, nos encontramos con que los principales problemas identificados son bastante similares a los descritos anteriormente. El primer análisis de conjunto del estado del medio ambiente en Europa (para todo el continente, no solamente para la Unión Europea) se publicó en 1995 y se conoce como *The Dobris Assessment*, por el nombre de la localidad de la República Checa donde se reunió el grupo que dio lugar a dicho análisis. En ese informe se presenta una lista de los 52 problemas ambientales principales en Europa (tabla I), así como una selección de los 12 más importantes (tabla II). Entre éstos, nueve tienen relación, directa o indirecta, con los cambios globales.

Como no podía ser menos, entre las medidas y propuestas para atajar los problemas identificados se señala la necesidad de disponer de observaciones más completas y precisas; es decir, nuevamente aparece la necesidad de reforzar la dimensión científica para un mejor diagnóstico de la situación.

A modo de resumen de lo anteriormente expuesto, se puede decir que existe una diferencia cualitativa importante entre los cambios ambientales actuales (climáticos y de otro tipo) y los acaecidos en el pasado: por primera vez en la historia del planeta, una especie –la humana– tiene la capacidad de influir de manera decisiva en procesos de ámbito global. Esa influencia se manifiesta, como hemos visto, de formas muy diversas y afecta a las distintas capas que envuelven al planeta: atmósfera, hidrosfera, biosfera y corteza, las cuales están experimentando cambios en sus características físicas, su constitución química y su dinámica.

Tabla I. Lista de los problemas ambientales en Europa presentados, sin orden de prioridad, en el *Dobris Assessment* (Stanners y Bourdeau, 1995)

- Accidentes nucleares.
- Destrucción del ozono estratosférico.
- Cantidad y calidad de las aguas subterráneas.
- Residuos peligrosos.
- Cambios climáticos.
- Degradoación de los bosques.
- Eliminación de residuos.
- Residuos nucleares.
- Calidad del aire en las ciudades.
- Conservación de la naturaleza y ecosistemas sensibles.
- Tóxicos persistentes en el aire.
- Accidentes industriales.
- Contaminación directa del mar.
- Contaminación del suelo por residuos.
- Conservación de especies amenazadas.
- Aumento del ozono troposférico.
- Producción de residuos.
- Contaminación de suelos y recursos.
- Fragmentación y destrucción de hábitats.
- Eutrofización de las aguas superficiales.
- Aportes fluviales a los mares.
- Cambios en los regímenes hidrológicos.
- Gestión de grandes ríos y lagos.
- Desertificación.
- Carencia de recursos hídricos.
- Degradoación debida al turismo.
- Seguridad alimentaria.
- Residuos urbanos.
- Vulnerabilidad creciente de sistemas complejos.
- Bioacumulación (metales, PCO).
- Seguridad energética.
- Erosión del suelo.
- Riesgos de la biotecnología.
- Contaminación microbiológica de las aguas superficiales.
- Derrames de petróleo.
- Elevación del nivel del mar.
- Intensificación del uso del territorio.
- Introducción de nuevos organismos.
- Escasez de materias primas industriales.
- Erosión costera.
- Radiactividad natural (radón).
- Pérdida de tierras agrícolas.
- Desplazamiento de las zonas biogeográficas.
- Desecación y llenado de zonas húmedas.
- Inundaciones, sequías y tormentas.
- Radiaciones no ionizantes.
- Salud de la sociedad.
- Modificación del paisaje.
- Ruido.
- Salud ocupacional.
- Pérdida del patrimonio cultural.
- Riesgos geológicos y geofísicos.
- Langostas y otras plagas.
- Contaminación térmica de las aguas.

Tabla II. Los doce problemas ambientales prominentes, según el documento anterior

- | | |
|--|---|
| – Cambios climáticos | – Disminución del ozono estratosférico |
| – Pérdida de biodiversidad | – Grandes accidentes |
| – Acidificación | – Ozono troposférico y otros oxidantes fotoquímicos |
| – Gestión de las aguas continentales | – Degradoación de los bosques |
| – Gestión y amenazas en zonas costeras | – Reducción y gestión de residuos |
| – Presiones urbanas | – Riesgos químicos |

Ya en los años setenta se comenzó a hablar de «la nueva atmósfera» o «la nueva hidrosfera», en el sentido de que la composición de ambas estaba variando, entre otras cosas por la introducción en las mismas de nuevos componentes originados por la actividad humana; esto es algo mucho más acusado en la actualidad. Asimismo, los seres humanos son actualmente el principal agente de transporte de materia sólida sobre la superficie terrestre. Hasta principios de este siglo el principal mecanismo de transporte de sólidos eran los ríos: el sistema montaña-río-mar. En la actualidad, la movilización directa o indirecta de materiales geológicos por las actividades humanas es, según las estimaciones existentes, superior a la de todos los sistemas fluviales del mundo. En el caso de



Fig. 13.- Excavaciones que ponen al descubierto algunos restos de la antigua Babilonia (Irak). El edificio que aparece en superficie es una reconstrucción reciente.

los países industrializados, esa movilización equivale a unas 20 toneladas por persona y año. Es decir, para expresarlo de manera simplificada, el sistema montaña-río-mar ha sido sustituido por el sistema (mina-cantera) - (carretera-ferrocarril) - (ciudad-industria). Igualmente, la reducción de hábitats naturales, la fragmentación de ecosistemas, la disminución en el número de individuos o la destrucción de especies y la introducción de nuevos tipos de organismos (piénsese en el enorme potencial que se está abriendo a través de la biotecnología) están dando lugar a profundos cambios en las características de la biosfera.

Aunque estos efectos sean particularmente importantes en la actualidad, es conveniente no olvidar que en épocas muy antiguas hay también ejemplos ilustrativos de cambios producidos en los sistemas naturales como consecuencia de la actividad humana. El inicio de la domesticación de especies animales y vegetales hace unos 11.000 años en Mesopotamia, representó el nacimiento de la agricultura y la ganadería. Esto llevó aparejada la sedentarización de la población, la aparición de concentraciones humanas importantes y de otras modificaciones sustanciales del paisaje, consecuencia de la eliminación de la cobertura vegetal y del laboreo en las áreas dedicadas a cultivos, así como de la posterior introducción de regadíos. Dos manifestaciones indirectas de estas acciones en la dinámica de los sistemas naturales fueron la salinización de los suelos y el fuerte aumento de la erosión. De la mag-

nitud de ésta da idea el hecho de que la antigua ciudad de Ur, patria de Abraham y una población costera en la época de los imperios mesopotámicos, está actualmente a más de 300 km de la costa, que avanzó como consecuencia de los aportes fluviales. Lo que queda de la famosa Babilonia, a pocos kilómetros de la actual Bagdad, está hoy en día bajo varios metros de sedimentos (figura 13).

EL CAMBIO CLIMÁTICO

Ya se ha comentado anteriormente que el cambio climático puede ser al mismo tiempo la causa y la consecuencia de toda una serie de cambios globales. En los últimos tiempos, especialmente a lo largo de la última década, se ha discutido mucho sobre la realidad de dicho cambio. La discusión sobre si el cambio climático se está o no produciendo carece de sentido desde el punto de vista científico. Es indudable que está teniendo lugar un cambio climático, como ha ocurrido a lo largo de toda la historia de la Tierra, antes y después de la aparición de los seres humanos. Los cambios climáticos producidos en el pasado han tenido magnitud muy superior a los experimentados en los dos últimos siglos, y también otros cambios que han afectado de manera muy importante al planeta, relacionados de manera más o menos directa con los anteriores.

Debemos ser conscientes de que los cambios climáticos y los cambios ambientales en general son una par-

te consustancial del funcionamiento de los sistemas naturales. Esos cambios han ocurrido siempre y no hay razón para pensar que no van a seguir ocurriendo; los seres vivos existentes en cada momento, incluyendo los seres humanos, se han adaptado a dichos cambios en el pasado. A modo de ejemplo, se indican algunos cambios significativos experimentados por la Tierra a lo largo de sus aproximadamente 4.600 millones de años de existencia:

- Una atmósfera con oxígeno abundante, aproximadamente similar al de la actual, existe desde hace poco más de 1.500 millones de años.
- Hace unos 600 millones de años, los glaciares cubrían la mayor parte de la Tierra.
- La vegetación aparece en los continentes hace unos 400 millones de años; la cobertura vegetal generalizada es, evidentemente, más reciente.
- Los continentes que hoy conocemos existen desde hace menos de 200 millones de años.
- La existencia de una fauna y una flora más o menos como las actuales se remonta a unas decenas de millones de años.
- Para encontrar otra época como la actual, con casquetes de hielo permanentes en las zonas polares (situación existente desde hace unos 10 millones de años en el Antártico y unos 4 en el Ártico), hay que remontarse a más de doscientos cincuenta millones de años.
- La desaparición de los glaciares en la Cordillera Cantábrica (y en muchas otras zonas del planeta) tuvo lugar hace unos 12.000-10.000 años.
- Hace unos 6.000-5.000 años, la temperatura media en la región cantábrica era 1-2 °C superior a la actual y el nivel del mar estaba 0,5-1 m más alto. La presencia de los hayedos como bosque típico de las zonas altas de la cordillera no tiene más de 4.000 años.
- Entre aproximadamente el 1400 y el 1800 de nuestra era, tuvo lugar la llamada Pequeña Edad de Hielo, en la cual la temperatura media era entre 0,5 y 1 °C inferior a la actual.

Es evidente que la flora, la fauna y el funcionamiento de los procesos morfodinámicos que afectan a la superficie terrestre cambiaron y se adaptaron a las modificaciones mencionadas. Los últimos cambios citados se produjeron cuando ya existía una importante presencia humana sobre la Tierra, y también las actividades humanas se adaptaron a las variaciones producidas.

Ahora bien, ¿debe interpretarse a partir de esto que los cambios actuales no tienen importancia ni deben ser motivo de preocupación? La respuesta ha de ser, tajantemente, no. Los cambios actuales pueden tener enorme trascendencia y gravedad y deben ser objeto de preocupación. Es indudable que los seres vivos, y en particular las personas, se han adaptado a los cambios pasados y que muy probablemente se adaptarán a los futuros; pero eso no

quiere decir, ni mucho menos, que la adaptación vaya a hacerse de forma no traumática. Las formas de adaptación pueden incluir desplazamientos de especies y poblaciones (incluyendo las humanas), hambrunas, epidemias, disminuciones acusadas del número de individuos, etc. La dimensión actual de la población humana, así como el tipo de actividades que desarrolla, hacen mucho más difícil que en el pasado (por no decir imposible) que puedan funcionar mecanismos de adaptación análogos a los que funcionaron, por ejemplo, durante las glaciaciones pleistocenas.

Además, debe tenerse presente que, a diferencia de lo que ocurrió con los cambios climáticos en el pasado, el cambio actual está producido en parte por las actividades humanas, y que tenemos la posibilidad de controlarlo, al menos hasta cierto punto. El último informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) establece por primera vez que existen evidencias científicas de que la actividad humana está influyendo en el cambio climático, aunque no se pueda cuantificar la importancia de la contribución humana al cambio observado. Hasta hace poco, dicho Panel no se había decidido a hacer este tipo de afirmación.

La figura 14 muestra los principales componentes del sistema climático, con indicación de los cambios que pueden afectarle. Como se aprecia, la mayor parte de esos cambios se relacionan con actividades humanas.

¿Qué sabemos sobre la magnitud y el ritmo de los cambios que se están produciendo en el clima? Conocer éstos es fundamental para evaluar las posibilidades de ajuste y adaptación y plantear estrategias a medio y largo plazo para mitigar los posibles efectos negativos de dichos cambios. Los datos contenidos en el último informe del IPCC pueden ayudarnos a responder a la pregunta anterior. Es conveniente señalar que no resulta fácil determinar la magnitud de las modificaciones que está experimentando el clima, por lo que los datos del informe deben tomarse con mucha cautela, como en el mismo se advierte. Las observaciones existentes cubren de manera bastante irregular el conjunto del planeta, y en muchas zonas las series de datos temporales no permiten definir tendencias fiables. Con todo, me parece oportuno resaltar algunos de los datos que presenta el IPCC.

- La temperatura media global aumentó 0,3-0,6 °C desde principios de siglo; en los últimos cuarenta años el aumento ha sido de 0,2-0,3 °C (figura 15).
- El rango térmico diurno se ha reducido; las temperaturas mínimas han aumentado aproximadamente el doble que las máximas. Esto ha coincidido en general con un aumento en la cobertura de nubes.
- Los indicadores indirectos de calentamiento atmosférico, tales como las temperaturas en sondeos y en océanos, extensión y duración de la cobertura de nieve, retroceso glacial, etc., son coherentes con los datos sobre temperaturas (figura 16).

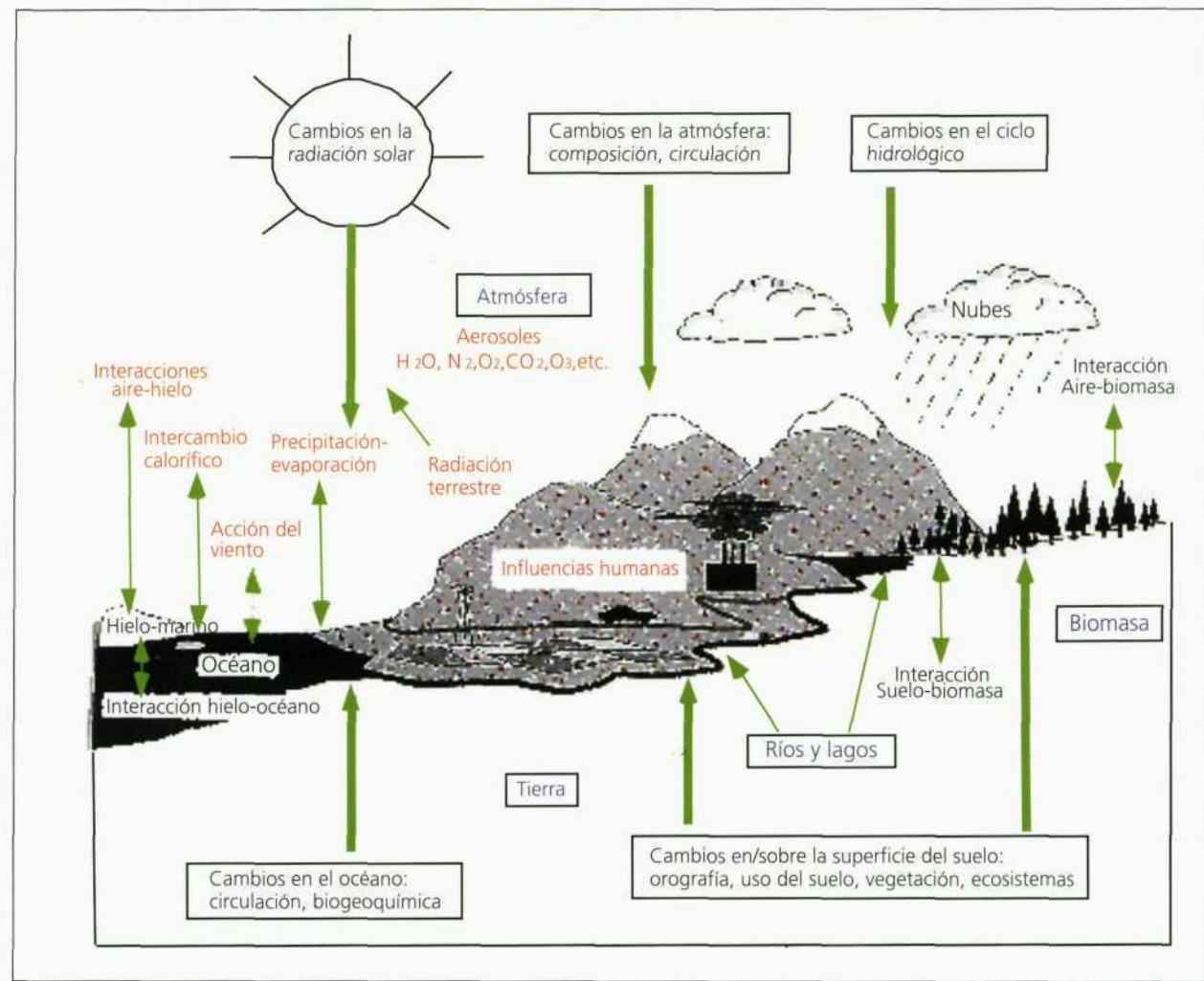


Fig. 14.- Representación esquemática de los componentes del sistema climático mundial (azul), sus procesos e interacciones (flechas finas) y algunos aspectos que están cambiando o pueden cambiar (flechas gruesas). Se observa que la mayoría de los cambios tienen un componente humano (Informe del IPCC, 1995).

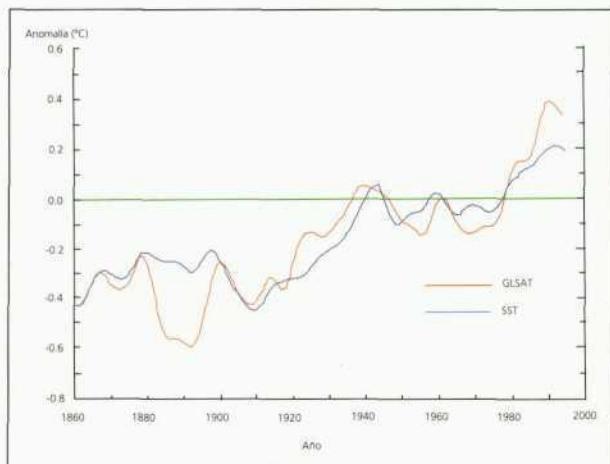


Fig. 15.- Anomalías globales de la temperatura de la superficie del mar (SST) y del aire sobre la superficie de los continentes (GLSAT), con respecto a la media para 1961-90.

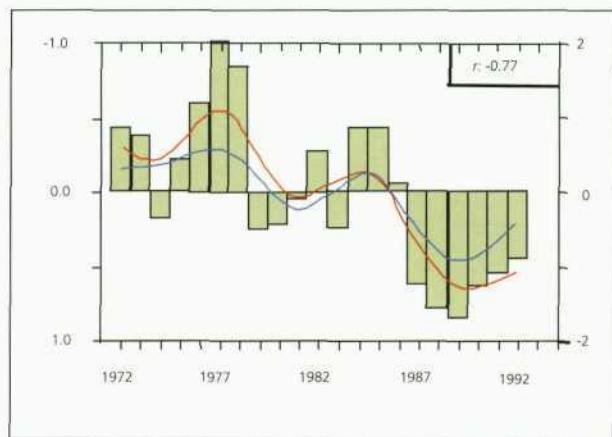


Fig. 16.- Variaciones en la extensión de la zona cubierta de nieve en el hemisferio norte, excluyendo Groenlandia, para el período octubre-septiembre entre 1972 y 1992. Las barras representan la anomalía anual y la curva roja la anomalía suavizada; la línea azul corresponde a la anomalía térmica en las zonas con cubierta de nieve temporal (Informe IPCC, 1995).

- Las precipitaciones han aumentado durante este siglo en las latitudes altas del Hemisferio Norte; sin embargo, desde 1960 parece haberse producido una disminución en las zonas subtropicales y tropicales desde África a Indonesia. La humedad del suelo, los caudales de los ríos y los niveles de los lagos han variado de forma coincidente.
- Aunque los datos son insuficientes, parece que se ha producido un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, tales como lluvias torrenciales, temporales, etc., en algunas zonas.
- Las temperaturas registradas en el Hemisferio Norte en las últimas décadas son las más altas de los últimos 600 años.
- En los últimos 100.000 años ha habido cambios climáticos tan rápidos o más que los actuales; sin embargo, en los últimos 10.000 años no se han registrado aumentos de 1 °C/siglo.
- El nivel del mar ha aumentado 10-25 cm en los últimos 100 años. La tasa de aumento es muy superior a la media de los últimos miles de años, aunque en ciertos momentos en ese período ha habido tasas mayores (figura 17).
- Para el próximo siglo, los modelos predicen aumentos de 20-100 cm en el nivel del mar, según los diferentes supuestos considerados (figura 18).

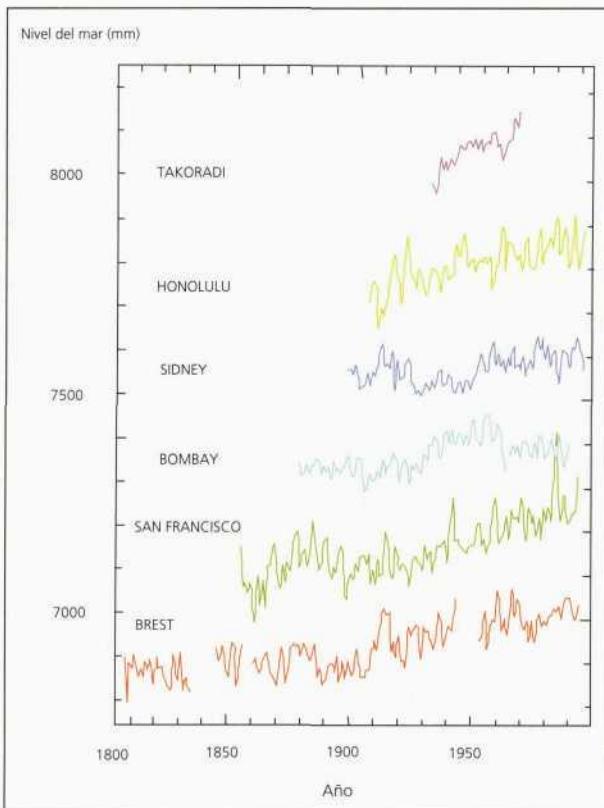


Fig. 17.- Registros de la variación del nivel del mar en distintos lugares del mundo, desde 1800. Las tasas anuales de ascenso durante el presente siglo oscilan entre los 0,9 mm/año de Sydney, Australia y los 3,1 mm/año de Brest, Francia (Informe IPCC, 1995).

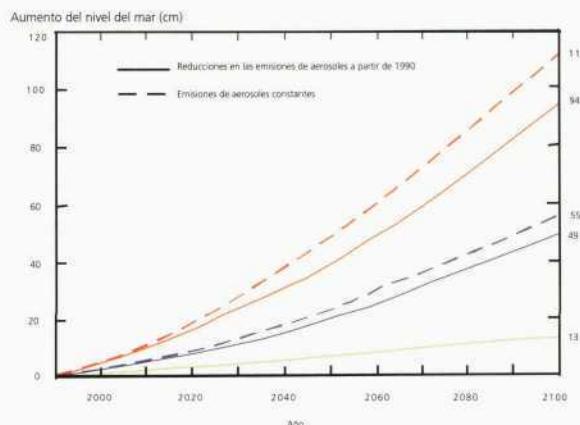


Fig. 18.- Proyecciones (máxima, media y mínima) de aumento global del nivel del mar. Las líneas de trazo para las proyecciones media y máxima se han calculado considerando que las emisiones de aerosoles permanecerán constantes; las líneas sólidas incluyen el efecto de cambios en las emisiones de aerosoles (Informe IPCC, 1995).

A primera vista puede parecer que variaciones del tipo de las citadas no revisten demasiada gravedad. A título de ejemplo, veamos algunas posibles consecuencias de una de ellas: el aumento del nivel del mar. Un aumento de 0,5-1 m puede representar problemas de extrema gravedad para ciertos estados insulares del Pacífico o del Índico, formados por pequeñas islas ligeramente elevadas sobre el nivel del mar, o bien para países como Bangla Desh o Egipto, que concentran densidades de población muy altas en llanuras costeras de origen aluvial y también ligeramente por encima del nivel marino actual. Pero los efectos también pueden ser considerables en regiones costeras aparentemente poco frágiles, como el litoral cantábrico. Análisis llevados a cabo hace algunos años muestran que elevaciones de 0,5 y 1 m afectarían, respectivamente, a 23,5 km² y 79 km² de zonas bajas en el litoral de Cantabria, Vizcaya y Guipúzcoa (figura 19); según estimaciones realizadas en 1993, el «capital» afectable en estas zonas oscilaría entre 1 y 10 billones de pesetas. La casi totalidad de dichas zonas bajas son, a su vez, el resultado de otra de las facetas del cambio global provocado por la actividad humana; el relleno, desecación o aislamiento de zonas húmedas litorales y zonas intermareales, que es una de las manifestaciones más significativas de la degradación costera antes mencionada. En lo que respecta a las playas, 0,5 y 1 m de aumento del nivel marino traerían como consecuencia la desaparición, por avance erosivo, de unos 20 y 31 km de playas, respectivamente, equivalentes más o menos al 40% y 60% de la longitud total existente (tabla III). La transcendencia económica de los efectos mencionados es evidente.

LOS SISTEMAS GLOBALES DE OBSERVACIÓN

Según se ha intentado mostrar en los apartados anteriores, lo que hasta ahora sabemos sobre el estado de los

Tabla III. Longitud (en km) de los diferentes tipos de playas en el Cantábrico oriental

Un ascenso del nivel del mar de 1 m representaría la desaparición de las playas sin capacidad de migración hacia el interior y con una anchura inferior a 100 m, así como una notable reducción de las demás [de RIVAS Y CENDRERO (1995). *Journal of Coastal Research*, Special Issue 12, págs. 289-298]

Provincia	Calas y playas de «bolsillo»		Playas limitadas por acantilados			Flechas y barras de migración limitada por edificios			Flechas y barras que pueden migrar	Playas dentro de bahías
	< 50 m	50-100 m	< 50 m	50-100 m	> 100 m	< 50 m	50-100 m	> 100 m		
Cantabria	2,37	0,82	5,67	2,90	0,00	0,87	6,77	5,25	8,57	2,55
Vizcaya	0,27	0,00	4,52	0,00	0,65	0,62	0,00	0,70	0,40	1,50
Guipúzcoa	0,17	0,00	1,16	0,00	0,00	4,05	0,82	0,70	0,25	0,20
Total	2,81	0,82	11,35	2,90	0,65	5,54	7,59	6,65	9,22	4,25

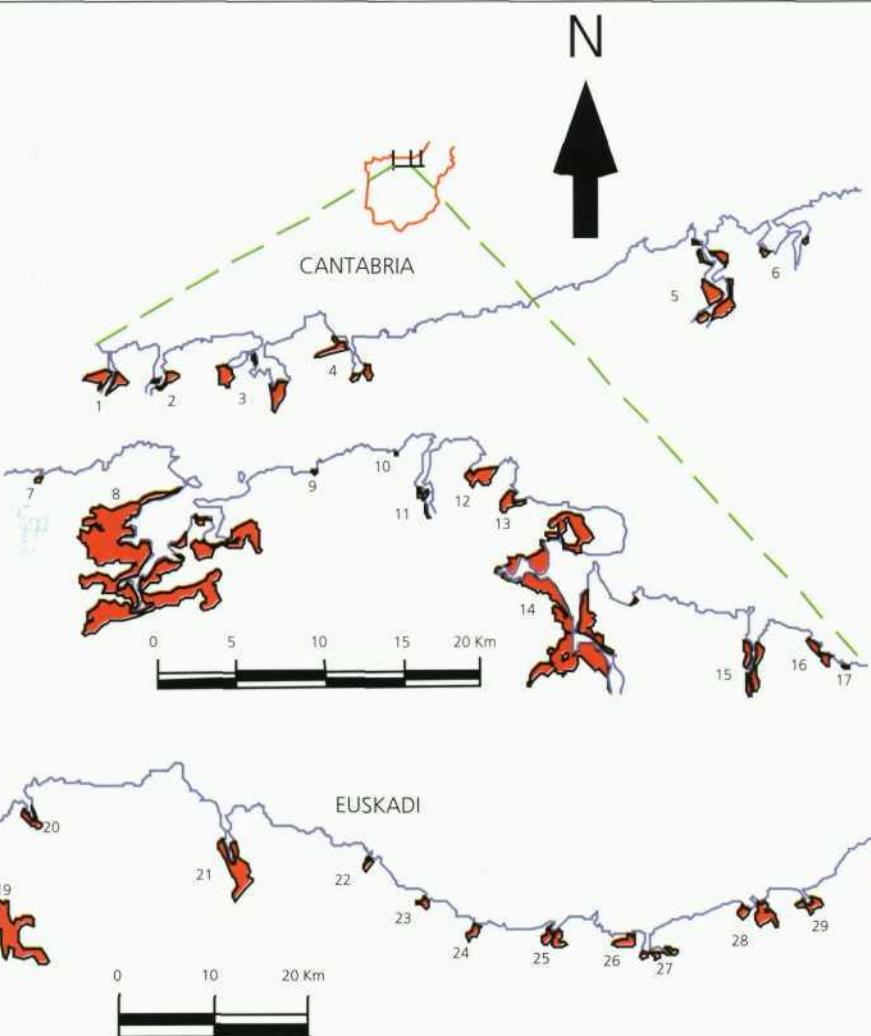


Fig. 19.- Áreas costeras rellenas o desecadas en el litoral cantábrico, con posibilidades de ser afectadas por el ascenso del nivel del mar (Rivas y Cendrero, 1991, *Journal of Coastal Research*, 7-2).

sistemas globales y sobre los cambios que están experimentando, nos permite obtener la conclusión inicial de que dichos cambios parecen ser significativos, que se deben en gran parte a la influencia humana y que pueden representar una amenaza seria para el futuro de la Humanidad si no se toman medidas adecuadas para atajarlos. No obstante, el conocimiento existente está muy lejos de ser satisfactorio.

En el documento de presentación de una iniciativa lanzada a finales de 1998, el *Millennium Assessment of the State of the World's Ecosystems* (Evaluación del Milenio sobre el Estado de los Ecosistemas Mundiales), se señala que: «Nuestro conocimiento sobre el estado de los ecosistemas terrestres es sorprendentemente limitado. No hay una evaluación global del estado de los ecosistemas, ni sabemos en qué regiones se han producido cambios significativos

ni de qué tipo; es más, este tipo de evaluación ni siquiera se ha intentado». Se concluye que es preciso realizar esa evaluación e identificar los puntos críticos que afectan a la productividad de los sistemas naturales mundiales.

Esta iniciativa, que se pretende llevar a cabo con el patrocinio del Instituto sobre los Recursos Mundiales (WRI), Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP), Banco Mundial, Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN), Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y Consejo Internacional de Uniones Científicas (ICSU), propone una evaluación en dos fases: la primera, 1999-2000, encaminada a recopilar y evaluar la información existente, con el fin de definir unas «categorías de degradación» iniciales e identificar las lagunas de conocimiento existentes; la segunda, 2000-2002, en la cual se realizarían reuniones regionales de expertos, por tipos de ecosistemas, y cuya finalidad básica sería determinar hacia donde se deben dirigir prioritariamente los esfuerzos para lograr una mejor gestión de los sistemas naturales y de sus recursos.

El planteamiento del *Millenium Assessment* es muy similar al que un par de años antes se hacía en la presentación del Sistema Global de Observación Terrestre (GTOS). En un folleto descriptivo del mismo se planteaba la siguiente pregunta: ¿Por cuánto tiempo podrá soportar la Tierra las presiones crecientes que la Humanidad ejerce sobre la atmósfera, las aguas y los sistemas terrestres? La respuesta que da es muy simple: NO LO SABEMOS.

Una consideración del estado actual del conocimiento sobre este tema, llevaba al comité directivo de GTOS a hacer las siguientes afirmaciones: No disponemos de suficientes datos sobre los sistemas terrestres y sus procesos físico-biológicos, ni sobre los procesos socioeconómicos que les afectan. No hay información de base fiable para conocer el estado del medio ambiente global ni para evaluar sus posibles cambios. No existe tampoco un sistema de vigilancia y alarma sobre los cambios que se están produciendo y que puedan requerir intervención. No sabemos si los acuerdos internacionales existentes van a producir los resultados que se esperan de los mismos ni si esos resultados serán adecuados para enfrentarse a los desafíos ambientales futuros.

A la vista de esa situación, ¿qué se está haciendo para obtener una mejor información sobre los cambios globales y una mejor comprensión de ellos? Dicho conocimiento es básico para poder plantear cualquier estrategia o política de adaptación a los cambios o de mitigación de sus efectos. Posiblemente el esfuerzo más ambicioso en este sentido lo constituyen los Sistemas Globales de Observación.

A lo largo de la presente década, y con ritmos de avance diferentes, se han ido poniendo en marcha esos programas, bajo el auspicio de diversos organismos de Naciones Unidas, que incluyen a UNESCO (Organización de Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura), FAO (Organización para la Alimentación y la

Agricultura), UNEP (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente), IOC (Comisión Oceanográfica Internacional), WMO (Organización Meteorológica Mundial), así como ICSU (Consejo Internacional de Uniones Científicas).

Los sistemas globales de observación son tres: Global Climate Observing System (GCOS), Global Ocean Observing System (GOOS) y Global Terrestrial Observing System (GTOS). En conjunto se les designa por medio de los acrónimos G3OS o GxOS. El proceso de puesta en marcha de los GxOS avanza lentamente, dadas las dificultades técnicas, financieras y políticas que implica la creación, a escala planetaria, de procedimientos de observación y medida regular de un conjunto amplio de parámetros, algunos de los cuales pueden considerarse sensibles por parte de los gobiernos de ciertos países.

GOOS comenzó su andadura en 1991 y trata de crear un sistema multidisciplinar de observación y seguimiento de los océanos a largo plazo para: a) proporcionar datos oceanográficos que sirvan para efectuar evaluaciones y predicciones fiables del estado presente y futuro del medio marino, con el fin de ayudar a mantener su salud y promover su uso sostenible; b) contribuir a la predicción de la variabilidad y cambios climáticos. En este sistema se asocian una serie de redes preexistentes, incorporando componentes nacionales, regionales y globales. Dentro de GOOS se han establecido una serie de módulos (Costero, Salud de los Océanos, Recursos Marinos Bióticos, Clima).

GCOS se estableció en 1992 con el fin de proporcionar a sus usuarios potenciales (científicos, gobiernos, organismos internacionales y acuerdos internacionales) información adecuada para: a) comprender el clima, su variabilidad y evolución y sus impactos sobre la sociedad; b) predecir el clima futuro (*El Niño*, calentamiento global y sus posibles conexiones); c) ayudar a los países a responder a los problemas relacionados con el clima (emisiones de gases de efecto invernadero, impactos climáticos, estrategias de respuesta). La atención prioritaria de GCOS se orienta hacia la predicción climática estacional (*El Niño*, eventos extremos, inundaciones, sequías) y al cambio climático secular (efecto invernadero, elevación del nivel del mar, impactos climáticos). También GCOS se construye a partir de redes preexistentes de observación *in situ*, tanto nacionales como internacionales, y de programas de observación por medio de satélites. El sistema está desarrollando procedimientos para proporcionar acceso a información de gran calidad y homogeneizada, así como a sistemas de tratamiento e interpretación de la misma.

El más reciente de los sistemas es GTOS, creado en 1996. No es casual que este sistema haya tardado más en iniciarse que los anteriores. Al igual que GCOS y GOOS, pretende integrar datos obtenidos por medio de redes preexistentes de observaciones *in situ* y por programas de observación por satélites. En este caso, sin embargo, los componentes de tipo nacional son absolutamente imprescindibles, y las dificultades técnicas, logísticas y políticas son especialmente acusadas. Por otro lado, a dife-

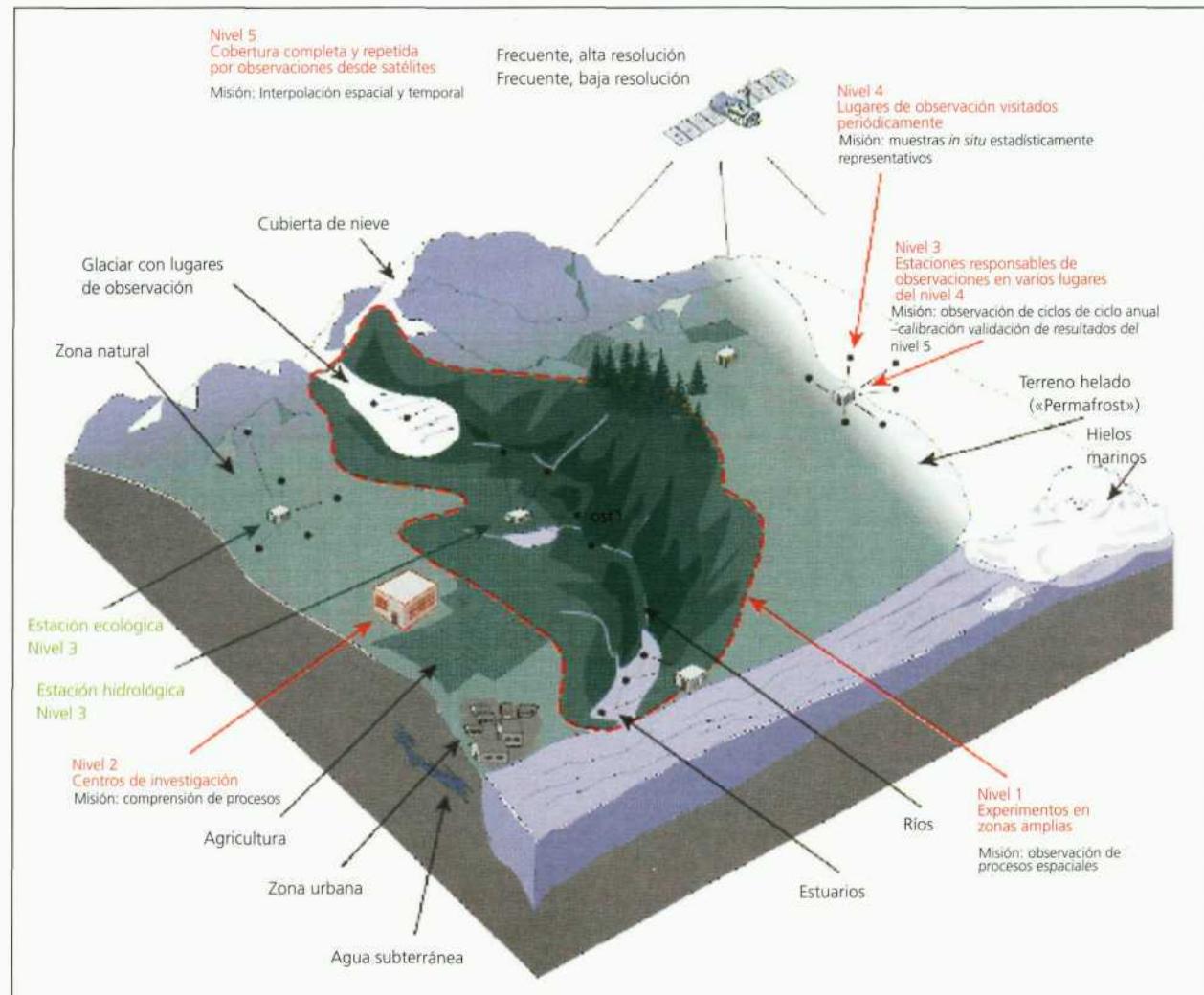


Fig. 20.- Estructura de la Estrategia de Observación Jerarquizada Global (GHOST), a utilizar por parte de GTOS.

rencia de lo que ocurre en el caso de los procesos atmosféricos y oceánicos, la dinámica que afecta a la superficie y a los ecosistemas terrestres no presenta una pauta global tan claramente definida. La misión de GTOS es: «Proporcionar a los responsables de la formulación de políticas, gestores de recursos e investigadores, acceso a los datos necesarios para detectar, cuantificar, localizar, comprender y alertar sobre los cambios (especialmente reducciones) en la capacidad de los ecosistemas terrestres para mantener un desarrollo sostenible». Los temas de interés prioritario para GTOS son: *a) cambios en la calidad de las tierras y del territorio; b) disponibilidad de recursos de agua dulce; c) pérdida de biodiversidad; d) cambio climático; e) contaminación y toxicidad.*

Lo que pretenden realizar los GxOS implica la necesidad de: *a) conocer y comprender la naturaleza, extensión, causa y tasas de los cambios; b) determinar las consecuencias de dichos cambios para el bienestar humano. Esto requiere combinar observaciones a largo plazo, a distintas escalas espaciales y temporales, con el estudio de procesos y el desarrollo de modelos.*

La estructura de los sistemas de observación y el tipo de parámetros cuya medida se pretende realizar a través de los mismos puede ilustrarse por medio del caso de GTOS. Este sistema ha establecido una jerarquía de cinco niveles de observación (figura 20). Esos niveles son los siguientes:

- 1. Experimentos en zonas amplias de especial interés.* Se trata de unos pocos lugares en el mundo (alrededor de 10), en los cuales se estén llevando a cabo investigaciones detalladas por parte de los grandes programas internacionales de investigación. La extensión del área a observar puede ser de centenares o miles de kilómetros cuadrados; un ejemplo de este tipo de áreas de nivel 1 son los transectos del IGBP (Programa Internacional sobre la Geosfera y la Biosfera).
- 2. Centros de investigación con programas a largo plazo.* Incluye centros que tengan personal e instalaciones permanentes, y programas de investigación o seguimiento propios que puedan incorporarse o adaptarse a las necesidades de GTOS. Como ejem-

plos se pueden citar cuencas experimentales, centros de investigación ligados a parques nacionales, estaciones agrológicas de carácter experimental, etc. En total se prevé incorporar aproximadamente un centenar en todo el mundo.

3. *Estaciones de campo.* Está previsto que existan alrededor de un millar de estas estaciones en el conjunto del planeta. Se tratará de lugares en los que no necesariamente debe haber programas de investigación, pero sí se deben realizar observaciones regulares, con instrumentación que permita efectuar medidas continuas o con periodicidad al menos anual. Normalmente tendrán a su cargo una serie de lugares de nivel 4.
4. *Lugares de calibración.* Estos puntos de observación, cuyo número rondará los 10.000, se conciben fundamentalmente como lugares de apoyo y validación de las determinaciones realizadas por medio de los satélites. Serán lugares en los que no necesariamente habrá instrumentación permanente, y que pueden visitarse para hacer ciertas observaciones o mediciones con periodicidad anual o incluso cada varios años.
5. *Observaciones desde satélites.*

Como se puede apreciar, existe una relación inversa entre el detalle de las medidas u observaciones a realizar, que crece desde el nivel 5 al nivel 1, y el grado de cobertura espacial que es total en el nivel 5 y abarca unas pocas zonas seleccionadas en el nivel 1. La figura 21 ilustra esta relación.

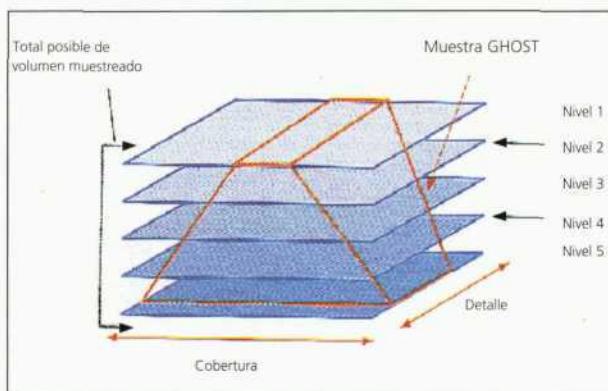


Fig. 21.- Relación entre grado de cobertura y nivel de detalle para los distintos niveles de observación de GTOS-GHOST.

Los parámetros cuya determinación regular se pretende llevar a cabo por medio de GTOS abarcan toda una serie de aspectos relacionados con los efectos de los cambios climáticos sobre los ecosistemas terrestres y sobre otras perturbaciones de éstos que pueden afectar al clima, a la productividad, etc.: vegetación, usos y cobertura del terreno y su perturbación, propiedades del suelo, radiación, hidrología, biogeoquímica, propiedades de la cromosfera, gases traza. La tabla IV presenta la relación completa de esos parámetros.

Como ejemplo del tipo de análisis que se pretende realizar y de las posibles aplicaciones de los mismos se puede tomar el proyecto piloto sobre productividad de los ecosistemas, cuyo plan fue establecido precisamente en España, en una reunión celebrada en Guernica en 1997. Los objetivos de ese proyecto piloto son: *a*) obtener datos globales normalizados de productividad primaria neta (NPP), que puedan transformarse en mapas regionales de rendimiento de bosques, pastizales o cultivos; *b*) utilizar la red global FLUXNET para transformar los datos de NPP en datos de productividad de los ecosistemas (NEP) y en flujos totales de CO₂, que puedan introducirse en los modelos globales del ciclo del carbono y de cambio climático.

Para ello, se harán determinaciones semanales de PPN por medio de satélites, para una serie de lugares de observación en los cuales se realizarán medidas *in situ* de los siguientes parámetros:

- precipitación diaria;
- temperaturas diarias máximas y mínimas;
- humedad absoluta, una vez por día;
- radiación recibida en 24 horas;
- velocidad y duración del viento;
- nitrógeno total en el suelo entre 0 y 30 cm de profundidad;
- contenido en arena y arcilla del suelo entre 0 y 30 cm;
- capacidad de retención de agua del suelo;
- fósforo total en el suelo, orgánico y extraíble;
- pH del suelo (grado de acidez);
- conductividad (contenido en sales);
- tipo y densidad de la cobertura vegetal;
- índice de superficie foliar (máximo y mínimo, estacionalmente).

El procedimiento operativo general para la contrastación de las determinaciones realizadas por medio de satélites a través de las medidas sobre el terreno, así como el tipo de productos finales a obtener, se muestran en la figura 22.

A lo largo de las páginas anteriores he procurado describir los programas de observación global de forma que quede clara su realidad actual. A pesar de que todos ellos se han establecido formalmente desde hace varios años, todavía distan mucho de ser operativos y de proporcionar las respuestas que se necesitan y se esperan de ellos.

Si bien, desde el punto de vista científico, las ideas sobre la información que es preciso obtener y cómo se debe utilizar están razonablemente bien definidas, la operatividad de los sistemas tardará bastante en lograrse. Los niveles de financiación que aportan a estos programas los correspondientes organismos patrocinadores son enormemente insuficientes; ello quiere decir que su puesta en marcha está condicionada por los acuerdos de participación que se establezcan entre redes o sistemas que ya funcionan (temáticas, nacionales, internacionales) o por la consecución de fuentes de financiación adicionales, por ejemplo para pro-

Tabla IV. Relación de variables propuestas por GCOS y GTOS

BGC=Biogeochemical Global Climate; GCM=General Circulation Model; GHG=GreenHouse Gases

	Detección de cambios	Predicción estacional-interanual	OBJETIVOS CLIMÁTICOS GCOS/GTOS			Evaluación de impactos
			B	G	G	
			G	C	H	
PROPIEDADES BIOFÍSICAS DE LA VEGETACIÓN						
Índice de superficie foliar (LAI)	X	X	X	X		
Productividad neta de ecosistemas (NEP)	X		X		X	X
Productividad primaria neta (NPP)	X		X		X	X
Biomasa sobre la superficie	X	X	X	X		X
Biomasa bajo la superficie			X			
Necromasa			X			
Contenido de fósforo y nitrógeno en las plantas			X			
Rugosidad superficial				X		
Índice de verde espectral de la vegetación	X	X	X	X		X
Conductancia de los estomas-máxima		X	X	X		
Estructura de la vegetación		X		X		
BIOGEOQUÍMICA						
Transporte biogeoquímico de la tierra a los océanos			X			X
Carbono, nitrógeno y fósforo disueltos en agua			X			
Deposición seca de nitrato y sulfato			X			X
Emisiones de CO ₂ , NO _x y SO _x por uso de combustibles fósiles	X	X	X	X		X
Uso de nitrógeno y fósforo en abonos			X			X
Químismo del agua de lluvia			X			X
Biomasa foliar – máximo de fijación de nitrógeno por las plantas			X		X	
Aerosoles sulfatados volcánicos	X	X	X			X
CUBIERTA Y USOS DEL SUELO/ PERTURBACIONES						
Área afectada por fuego	X		X	X	X	X
Cobertera del terreno	X	X	X	X	X	X
Usos del suelo	X	X	X		X	X
PROPIEDADES DEL SUELO						
Capacidad de cambio catiónico			X			
Densidad del suelo			X	X	X	
Carbono total del suelo			X			X
Nitrógeno total del suelo			X		X	
Humedad del suelo		X	X	X	X	X
Granulometría			X	X	X	
Fósforo disponible en el suelo			X			
Fósforo total en el suelo			X			
pH (acidez)			X			
Estado de la superficie del suelo			X	X	X	
Espesor de la zona radicular			X	X	X	

Tabla IV (continuación). Relación de variables propuestas por GCOS y GTOS
 BGC=Biogeochemical Global Climate; GCM=General Circulation Model; GHG=GreenHouse Gases

	Deteción de cambios	Predicción estacional-interanual	OBJETIVOS CLIMÁTICOS GCOS/GTOS			Evaluación de impactos	
			Modelos/Proyecciones a largo plazo				
			B G M	G C M	G H G		
HIDROLOGÍA							
Humedad relativa		X	X	X			
Esorrentia superficial	X	X	X	X		X	
Evapotranspiración	X	X	X	X			
Flujos en reservas de agua superficial	X		X	X		X	
Flujos en reservas de agua subterránea	X					X	
Precipitación (sólida y líquida)	X	X	X	X		X	
PROPIEDADES CRIOSFÉRICAS							
Temperatura de la neviza	X						
Glaciares y casquetes de hielo	X						
Balance de masa de los casquetes	X	X	X			X	
Geometría de los casquetes de hielo	X						
Helada y deshielo de lagos y ríos	X					X	
Permafrost – capa activa	X		X	X		X	
Permafrost – estado térmico	X	X	X			X	
Concentración/extensión de hielos marinos	X	X		X		X	
Movimiento de hielos marinos	X						
Espesor de los hielos marinos	X						
Área cubierta de nieve	X		X	X		X	
Profundidad de la nieve	X	X					
Equivalente en agua de la nieve	X	X		X		X	
RADIACIÓN Y VARIABLES RELACIONADAS							
Aerosoles	X	X	X	X		X	
Albedo	X	X		X			
Cubierta de nubes	X	X		X			
Radiación incidente-onda corta	X		X	X		X	
Radiación reflejada-onda corta	X	X	X	X	X	X	
Radiación fotosintéticamente activa (PAR)			X				
Radiación emitida-onda larga	X	X		X			
Temperatura de la superficie-aire	X	X	X	X	X	X	
Densidad del ozono troposférico	X	X	X	X	X		
GASES TRAZA							
Flujos de CO ₂	X	X	X	X	X	X	
Flujos de CH ₄	X	X	X	X	X	X	
VARIABLES AUXILIARES							
Velocidad del viento		X	X	X			
Topografía			X	X	X		

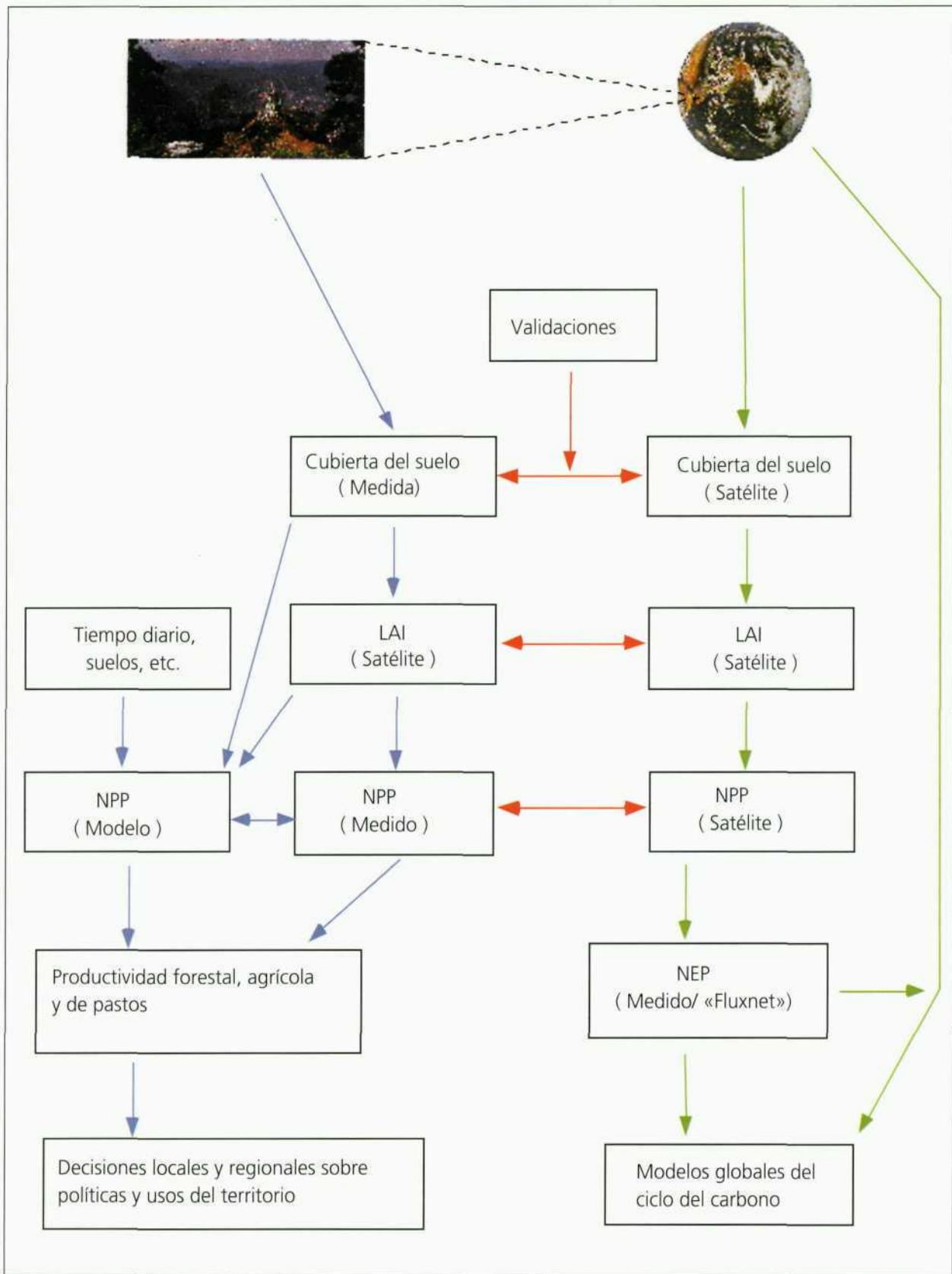


Fig. 22.- Relaciones entre medidas *in situ*, medidas desde satélites y resultados de la aplicación de modelos, para la obtención de Productividad Primaria Neta, Productividad Neta de los Ecosistemas y estimaciones de rendimientos (cosechas, pastos, bosques), a escala local y regional, por parte de GTOS-GCOS.

yectos concretos como el proyecto piloto antes descrito. Como es lógico, las dificultades señaladas afectan de manera especial a los países en vías de desarrollo, que abarcan la mayor parte del planeta. Por todo ello, es posible que transcurran bastantes años antes de que se logre una cobertura satisfactoria y realmente global para los tres sistemas.

Una buena prueba de las dificultades que entraña la realización de análisis y evaluaciones de ámbito global como las que se requieren es el hecho de que los mismos organismos puedan plantearse el patrocinio de iniciativas que se solapan, en gran parte –como GxOs y el *Millenium Assessment*–, con la segunda ignorando aparentemente la primera y marcándose unos plazos que parecen poco realistas, a la vista de la experiencia anterior. Existe por tanto un riesgo claro de que la información científica necesaria para la toma de decisiones preventivas o correctivas por parte de organismos internacionales o de gobiernos nacionales no llegue a tiempo, por lo menos para algunos de los procesos de degradación que se han observado.

Un buen ejemplo de lo anterior lo constituye la emisión de gases productores de efecto invernadero. Un estudio publicado en *Nature* a finales de 1998 por M. I. Hoffert señala que la estabilización del contenido de CO₂ en la atmósfera no podrá lograrse si en los próximos cincuenta años no se multiplica por 10 la producción de energía a partir de fuentes no emisoras de dióxido de carbono. Aun así, esto implicaría la estabilización con un nivel de CO₂ doble del existente al inicio de la revolución industrial, lo que todavía podría producir efectos negativos sobre el clima global y los ecosistemas. Utilizando un modelo que estima las emisiones de dióxido de carbono en función de cuatro variables (emisiones de CO₂ por unidad de energía producida, consumo energético por unidad de producción económica, producción económica por persona, población total), M. I. Hoffert llega a la conclusión de que la producción energética mundial actual, equivalente a 11 Terawatts, deberá aumentar hasta 30 Terawatts en 2050; en ese período, la energía producida a partir de fuentes no emisoras de CO₂ deberá pasar de 1,5 a 15 Terawatts. Según el citado autor, esto representa una colosal transformación, para la cual el sistema mundial de producción de energía no está preparado; la introducción de los cambios citados requerirá un esfuerzo internacional de una magnitud comparable al Programa Apolo de investigación espacial.

Este ejemplo ilustra muy claramente las dificultades que para la implantación de medidas correctoras representan los largos lapsos de tiempo que se necesitan para la obtención de información científica fiable, y para la puesta en marcha de soluciones concretas, que a su vez requieren un tiempo considerable para la solución de los problemas técnicos y para la aportación de recursos financieros.

EL DESARROLLO SOSTENIBLE

Posiblemente, la principal finalidad de los distintos esfuerzos que se llevan a cabo para mejorar nuestro conoci-

miento científico del estado de los sistemas naturales, y nuestra comprensión de los cambios que están experimentando, sea proporcionar las bases para lograr un uso sostenible del medio y de sus recursos, tal como se comentaba en la introducción. Ahora bien, es muy posible que la comprensión exacta de los procesos que relacionan las actividades humanas con el estado de los distintos componentes del medio, y éste con las medidas encaminadas a corregir el deterioro ambiental, no se logre a corto plazo. No obstante, esto no debería ser una razón para que no se tomaran decisiones al respecto.

Con el fin de ayudar a resolver este problema, se puso en marcha en 1995 un proyecto conjunto del Programa SCOPE (Comité Científico sobre Problemas del Medio Ambiente) y la Comisión de Naciones Unidas sobre Desarrollo Sostenible. Este proyecto, que a su vez se basa en iniciativas anteriores de organismos como la OCDE (Organización de Desarrollo y Cooperación Económicos) y el Banco Mundial, se titula *Indicadores de desarrollo sostenible* y trata de desarrollar un sistema de «medición» de las presiones que las actividades humanas producen sobre el medio, del estado de salud de éste y de la eficacia de las medidas correctoras que se implanten.

La idea de partida es que, si bien no podemos en muchos casos conocer con exactitud qué efectos pueden derivarse de las acciones humanas sobre el medio, ni en qué medida ciertos cambios observados en éste pueden deberse a influencias humanas deliberadas o indirectas, sí es posible establecer ciertas correlaciones que cabe esperar que respondan a relaciones causa-efecto. Por ejemplo, no estamos en condiciones de cuantificar el efecto que el aumento de la producción agraria va a producir en la biodiversidad, pero sí es razonable suponer que ese aumento, que implica una mayor extensión de terrenos cultivados, llevará aparejada una reducción de los hábitats naturales y de la biodiversidad. Esto es, la «presión» que representa la mayor producción agraria debe traer como consecuencia una modificación del «estado» de la biodiversidad, aunque no podamos decir en qué medida. Un razonamiento similar nos lleva a decir que ese «estado» debe verse favorablemente influido por la implantación de medidas de «respuesta» ante la degradación, tales como la declaración de zonas protegidas o las inversiones dedicadas a la regeneración de espacios naturales, aunque tampoco podamos cuantificar esa influencia. Por tanto, debe ser posible identificar una serie de *indicadores* de presión, estado y respuesta que nos permitan «medir» o hacer un seguimiento del grado de presión que estamos aplicando sobre el medio, la condición en que éste se encuentra y la intensidad de los esfuerzos de mitigación o conservación que se realizan. El esquema conceptual en el que se basa la propuesta de estos indicadores se muestra en la figura 23. Si se desarrolla un sistema de indicadores de este tipo que sean aplicables a *los países*, podremos contar con un procedimiento que nos permita hacer una cierta evaluación y seguimiento de cómo evolucionan nuestras relaciones con el medio a escala global.

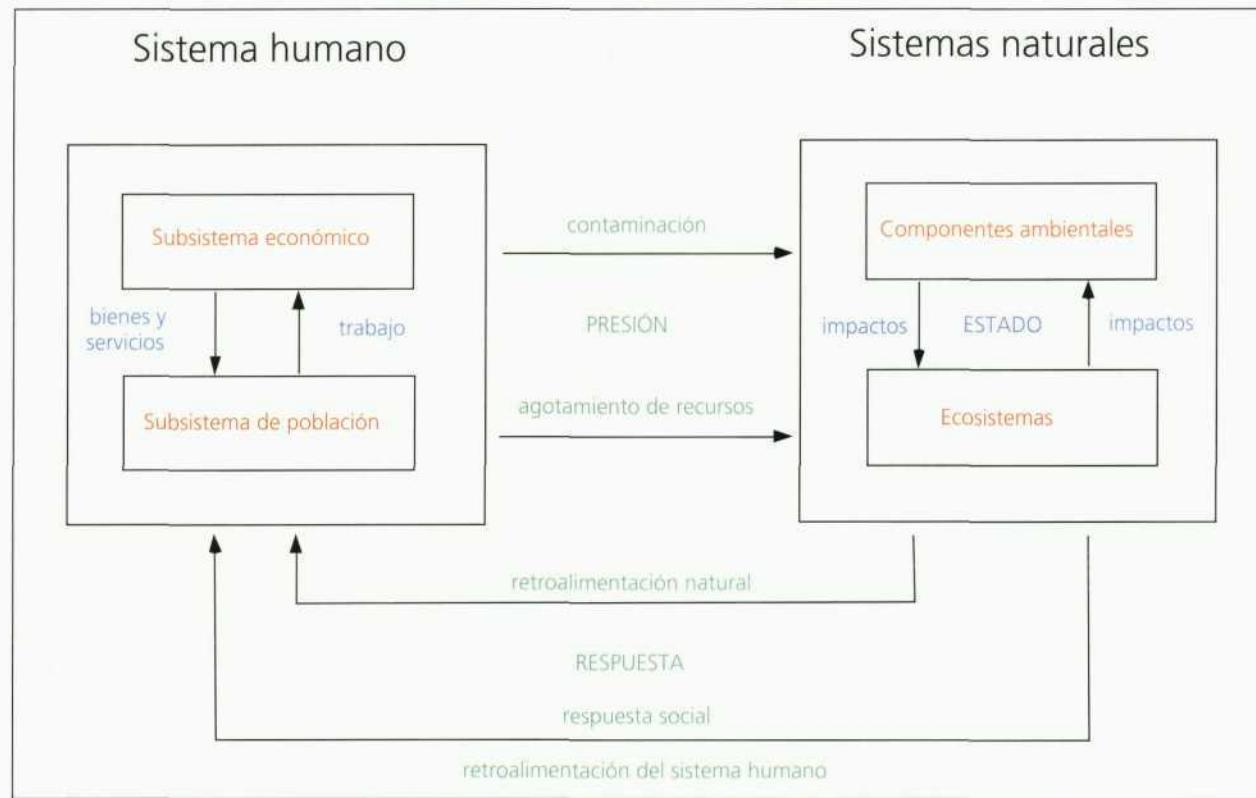


Fig. 23.– Marco conceptual para los indicadores de presión, estado y respuesta (Cendrero, 1997, *Naturzale*, 12; modificado a partir de UNEP-UNDP/PCSD, 1995).

Por otro lado, hemos de tener presente que el sistema humano y los sistemas naturales establecen tres tipos fundamentales de interacciones, que corresponden a diferentes tipos de funciones del medio (figura 24): las personas obtenemos ciertos *recursos* del medio, eliminamos en éste distintos tipos de *residuos* y utilizamos la superficie terrestre para la implantación de nuestras actividades, aprovechando toda una serie de *servicios* que presta la naturaleza (por ejemplo, depuración del aire por parte de los bosques, papel regulador del ciclo hidrológico y de ciertos riesgos naturales que ejerce la vegetación, potencial re-creativo de los espacios naturales, etc.). Por tanto, el diseño de un sistema de indicadores tal como el propuesto debe tener en cuenta estas tres funciones y debe incluir indicadores del medio como *fuente de recursos*, *sumidero de residuos* y *soporte de actividades* o proveedor de servicios.

La tabla V presenta, a modo de ejemplo, un conjunto de indicadores de presión, estado y respuesta para las tres funciones comentadas y para el bienestar humano, propuesto por el Banco Mundial para aplicarlo a los países. Es razonable aceptar que, a pesar de que ese conjunto de indicadores no nos proporcione información precisa sobre relaciones causa-efecto que conocemos solamente de manera imperfecta, su determinación regular para el conjunto de los países puede permitirnos obtener una imagen bastante más precisa que la actual sobre lo que se menciona en el título de este capítulo: el estado del «sistema terres-

tre» y los cambios globales que le están afectando, especialmente los relacionados con la actividad humana.

COMENTARIOS FINALES

A modo de recapitulación, se puede señalar lo siguiente. Con los datos existentes hasta el momento, es razonable afirmar que el sistema terrestre en su conjunto está experimentando cambios apreciables, que dan lugar a un deterioro de su «estado de salud». Estos cambios se manifiestan en los distintos sistemas naturales a escala nacional, regional y continental, y también, y esto es más grave, en el funcionamiento de ciertos procesos a escala global, como los que afectan a la atmósfera-clima-hidrosfera y a la biosfera. Esas modificaciones se deben en parte a procesos naturales y en parte –y de manera creciente– a la influencia directa o indirecta de distintas actividades humanas. Los cambios citados pueden poner en peligro la capacidad de los sistemas naturales para cumplir una serie de funciones esenciales desde el punto de vista humano (fuente de recursos, sumidero de residuos y soporte de actividades o proveedor de servicios).

No obstante, hemos de ser conscientes de que nuestro grado de conocimiento de los cambios globales es limitado y que todavía son pocos los hechos que en este campo podemos considerar firmemente establecidos. Ese insuficiente conocimiento tiene dos facetas principales: a)

CRITERIOS SOBRE DESARROLLO SOSTENIBLE; MODELO CONCEPTUAL

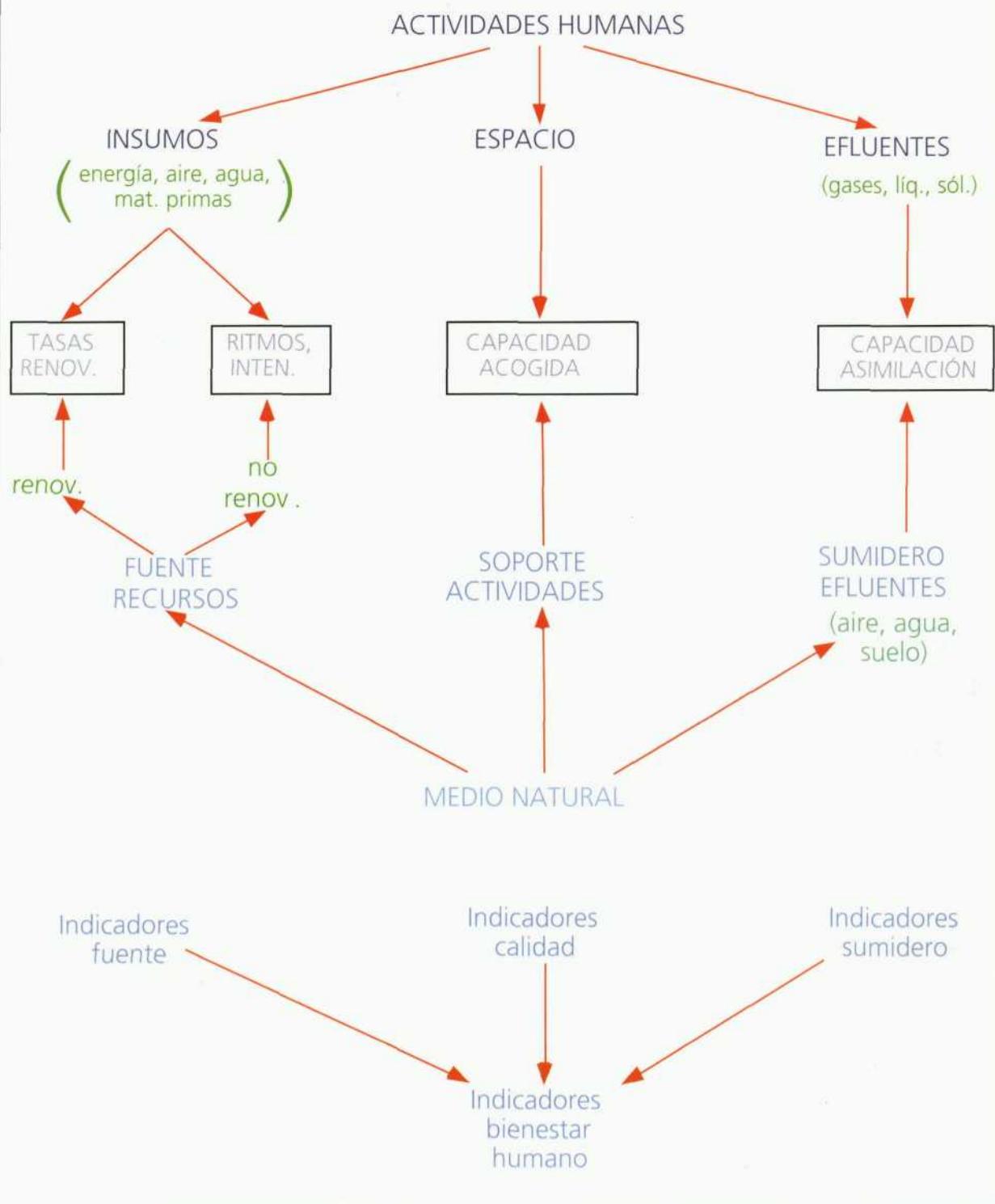


Fig. 24.- El medio como fuente, sumidero y soporte; criterios de desarrollo sostenible (Cendrero, 1997, *Naturzale*, 12; en parte procede de D. Gómez Orea, comunicación personal, 1995).

Tabla V. Matriz de indicadores ambientales propuesta por el Banco Mundial

Tema	Presión	Estado	Respuesta
Indicadores de fuente			
1. Agricultura:	Valor añadido/prod. bruta	% riqueza en tierras cultivadas	Términos de intercambio rural/urbano
a. calidad del suelo	Degrado del suelo inducida	Limitaciones climáticas y de suelo	_____
b. otros	_____	_____	_____
2. Bosques	Cambios de uso del suelo	Sup., vol., distribución, valor bosques	Relación <i>input/output</i> , tasa reciclado
3. Recursos marinos	Contam., demanda pescado, consumo	Reservas de especies marinas	% cobertura convenciones int.
4. Agua	Intensidad de uso	Población abastecida (%)	Medidas de eficiencia implantadas
5. Recursos geológicos:	Tasa extracción	% riqueza en recursos geológicos	Balance materiales en planes nac.
a. combustibles fósiles	Tasa extracción	Reservas probadas	Subsidios para eficiencia energética
b. metales y minerales	Tasa extracción	Reservas probadas	Relación <i>input/output</i> , tasa reciclado
Indicadores de sumidero			
1. Cambio climático:	_____	_____	_____
a. gases de invernadero	Emissions de CO ₂	Concentr. de gases de invernadero en atm.	Política de eficiencia energética
b. ozono estratosférico	Consumo aparente de CFCs	concentr. de CFCs en atmósfera	% cobertura convenciones int.
2. Acidificación	Emissions NO _x , SO _x	Concentr. de NO _x , SO _x y pH en precipit.	Gasto en medidas anticontaminación
3. Eutrofificación	Uso de fosfatos y nitratos	DBO, P y N en ríos	% pobl. con tratamiento residuos
4. Toxicificación	Prod/carga de residuos tóxicos	Concentr. de Pb, Cd,etc., en ríos	% gasolina sin plomo
Indicadores de soporte			
1. Biodiversidad	Cambios de uso del territorio	Hábitat/res. nat.	% áreas amenazadas protegidas
2. Océanos	Especies amenazadas/extintas (% total)	_____	_____
3. Áreas esp. (p. ej., marismas)	_____	_____	_____
Indicadores de bienestar humano			
1. Salud:	Incidencia de enfermedades	Esperanza de vida al nacer	% gasto público en salud
a. calidad del agua	_____	Oxígeno disuelto, coliformes fecales	Acceso a agua salubre
b. calidad del aire	Demanda energética	Concentr. partículas, SO ₂ , etc.	_____
c. riesgos laborales	_____	_____	_____
2. Seguridad y calidad alimentaria	_____	_____	_____
3. Vivienda/urbanismo	Densidad población (pers./km ²)	_____	_____
4. Residuos	Prod. res. ind. y municipal	_____	% gasto público en vivienda
5. Desastres naturales	_____	_____	_____

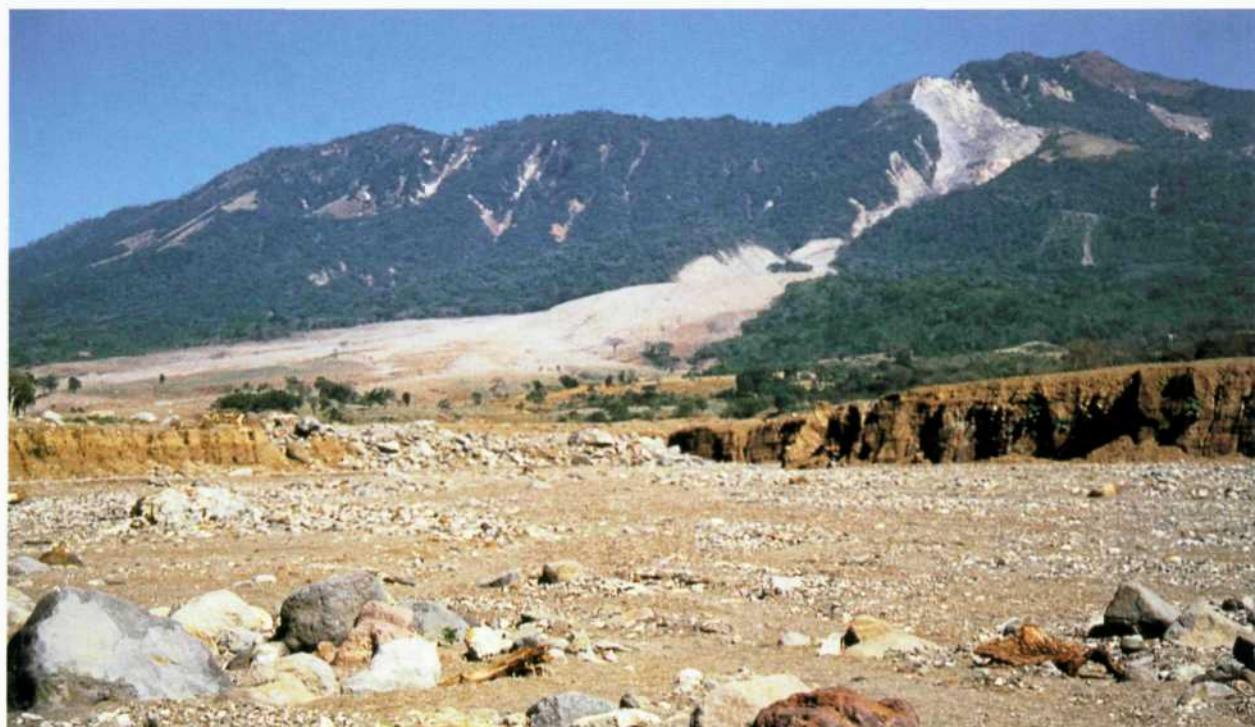


Fig. 25.—Flujo de derrubios acaecido en octubre de 1998 en la ladera del volcán Casitas (Nicaragua), consecuencia del huracán Mitch. Los episodios de este tipo tienden a ocurrir cada vez con más frecuencia, como resultado de la conjunción de cambios climáticos y de actividades que degradan el territorio.

comprensión insuficiente de muchos procesos naturales y de las relaciones causa-efecto entre actividades humanas y procesos de deterioro; *b)* falta de datos, por el reducido número de observaciones y medidas de calidad sobre toda una serie de parámetros y procesos, sobre todo en ciertas zonas del mundo.

Con el fin de contribuir a cubrir estas lagunas y de mejorar nuestra capacidad de predicción y de adaptación, se han puesto o se están poniendo en marcha diversos programas de investigación y seguimiento a escala internacional, y también nacional. Sería muy deseable que en España se establecieran programas de observación y seguimiento análogos.

Una de las lecciones que debemos extraer de todo lo anteriormente expuesto es que es mejor y más «rentable», a medio y largo plazo, comprender el funcionamiento de los sistemas naturales, adaptar nuestras actividades a ellos y aprovechar las posibilidades, recursos y servicios que ofrecen, en vez de modificar y forzar dicho funcionamiento, lo que representa un mayor consumo de energía y de recursos y puede hacernos pagar un alto precio en el futuro. La figura 25 muestra algunas de las consecuencias de los cambios climáticos a escala global y de cambios de ámbito local-regional, unidos a una mala adaptación al funcionamiento de los procesos naturales.

Para mejorar nuestro grado de preparación y nuestra capacidad de respuesta ante estos problemas, es crucial que intensifiquemos los esfuerzos de investigación científica, único procedimiento para avanzar en el conocimiento sobre el funcionamiento de este planeta que es nuestra casa. En resumen, puede decirse que la frase de Francis

Bacon, en su *Novum Organum* (1620), «La naturaleza, para ser dominada, ha de ser obedecida», sigue siendo de total actualidad.

BIBLIOGRAFÍA

- CENDRERO, A. *et al.*, *Medio Ambiente y Desarrollo; antes y después de Rio 92*, Fundación Marcelino Botín, Santander, 1993.
- COMISIÓN DE NACIONES UNIDAS SOBRE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO, *Nuestro Futuro Común*, Alianza Editorial, Madrid, 1987.
- GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO, *IPCC-Segunda Evaluación; Cambio Climático 1995* (Síntesis del segundo informe de evaluación del IPCC), Organización Meteorológica Mundial y Programa de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente, Ginebra-Nairobi, 1995.
- MOLDAN y S. BILLHARZ, *Sustainability Indicators*, Wiley, Nueva York, 1997.
- MOPT, *Rio 92; conclusiones de la cumbre de la Tierra*, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Madrid, 1992.
- STANNERS y P. BOURDEAU, *Europe's Environment; The Dobris Assessment*, Agencia Europea de Medio Ambiente, Copenhague, 1995.
- TOLBA, M. *et al.*, «Río + 5 = Expectativas Frustradas», *Fuentes UNESCO*, n.º 92, 1997; págs. 7-16.
- UNEP (Programa de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente), *Global Environment Outlook*, Oxford University Press, Nueva York-Oxford, 1997.