

Cambio global

Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra

Esta obra, dirigida al público en general y elaborada por un equipo interdisciplinar, aborda con un lenguaje claro y asequible pero sin renunciar al rigor científico, el complejo problema del cambio global, un desafío de dimensiones colosales para la humanidad. El cambio global se define en esta obra como el impacto de la actividad humana sobre los procesos fundamentales que regulan el funcionamiento del sistema Tierra. Los autores describen las múltiples dimensiones del cambio global, sus causas y sus consecuencias. Se describe la transformación de la superficie del planeta Tierra por la actividad humana y sus impactos sobre los ciclos del agua, los elementos y el sistema climático, incluyendo la introducción de miles de compuestos químicos sintéticos en la biosfera. Se presentan también sus impactos sobre los ecosistemas y sobre la sociedad, así como el papel que los distintos actores de la sociedad han de jugar en la respuesta a este problema. Esta exposición pretende despejar la confusión que el aluvión de noticias e informaciones, a veces contradictorias, genera en la sociedad. Los autores prestan particular atención a la definición de las estrategias de adaptación y mitigación que los distintos actores de la sociedad, desde ciudadanos a políticos, pueden desplegar para minimizar el impacto del cambio global, animándoles al mismo tiempo a aprovechar las oportunidades que estos cambios pueden conllevar.

Cambio global

Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra

CARLOS M. DUARTE
COORDINADOR

Cambio global

Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra

COLECCIÓN **DIVULGACIÓN**

Cambio global

Impacto de la actividad humana
sobre el sistema Tierra

Carlos M. Duarte (coordinador)

Juan Carlos Abanades

Susana Agustí

Sergio Alonso

Gerardo Benito

Juan Carlos Ciscar

Jordi Dachs

Joan O. Grimalt

Iván López

Carlos Montes

Mercedes Pardo

Aida F. Ríos

Rafel Simó

Fernando Valladares



Madrid, 2009



Con la COLECCIÓN DIVULGACIÓN, el CSIC cumple uno de sus principales objetivos: proveer de materiales rigurosos y divulgativos a un amplio sector de la sociedad. Los temas que forman la colección responden a la demanda de información de los ciudadanos sobre los temas que más les afectan: salud, medio ambiente, transformaciones tecnológicas y sociales... La colección está elaborada en un lenguaje asequible, y cada volumen está coordinado por destacados especialistas de las materias abordadas.

COMITÉ EDITORIAL

Pilar Tígeras Sánchez, Directora
Beatriz Hernández Arcediano, Secretaria
Miguel Ángel Puig-Samper Mulero
Alfonso Navas Sánchez
Gonzalo Nieto Feliner
Cuca Viamonte Tortajada
Jaime Pérez del Val
Rafael Martínez Cáceres
Carmen Guerrero Martínez

CONSEJO ASESOR

Javier Martínez de Salazar
José Manuel Prieto Bernabé
Carlos Duarte Quesada
Fernando Hiraldo Cano
Mariano Sánchez García
Uxío Labarta Fernández
Mariano Laguna Castrillo
Luis Calvo Calvo
Pía Paraja García

Catálogo general de publicaciones oficiales
<http://www.060.es>



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



CSIC



Edición ampliada y revisada: 2009

- © CSIC, 2009
- © Carlos M. Duarte (coord.), Juan Carlos Abanades, Susana Agustí, Sergio Alonso, Gerardo Benito, Juan Carlos Ciscar, Jordi Dachs, Joan O. Grimalt, Iván López, Carlos Montes, Mercedes Pardo, Aida F. Ríos, Rafel Simó y Fernando Valladares, 2009
- © Los Libros de la Catarata, 2009
- © Fotografía de portada: Estrecho de Fram, océano Glaciar Ártico (autor: M. Elviro)

Reservados todos los derechos por la legislación en materia de Propiedad Intelectual. Ni la totalidad ni parte de este libro, incluido el diseño de la cubierta puede reproducirse, almacenarse o transmitirse en manera alguna por medio ya sea electrónico, químico, mecánico, óptico, informático, de grabación o de fotocopia, sin permiso previo por escrito de la editorial.

Las noticias, asertos y opiniones contenidos en esta obra son de la exclusiva responsabilidad del autor o autores. La editorial, por su parte, sólo se hace responsable del interés científico de sus publicaciones.

ISBN (CSIC): 978-84-00-08915-3
ISBN (Catarata): 978-84-8319-469-0
NIPO: 472-09-179-1
Depósito legal: M-47.582-2009

En esta edición se ha utilizado papel ecológico sometido a un proceso de blanqueado ECF, cuya fibra procede de bosques gestionados de forma sostenible.

Índice

Agradecimientos	11
Presentación	13
1. Introducción	17
2. ¿Qué es el cambio global?	21
3. La maquinaria de la biosfera	35
3.1. Los motores del clima	35
3.2. El ciclo del agua	43
3.3. Los ciclos de los elementos	45
3.4. El papel de los organismos	49
4. La maquinaria de la biosfera en el Antropoceno	51
4.1. Perturbaciones en el ciclo del agua	51
4.2. Perturbaciones en los ciclos de elementos	57
4.3. Emisiones de materiales a la atmósfera	63

4.4.	Nubes, hielo, aerosoles y albedo	65
4.5.	Contaminantes y nuevas sustancias en la biosfera	69
4.6.	Desertificación, cambios en el uso del suelo	70
4.7.	Detección y observación de perturbaciones	75
4.8.	La erosión de la capa de ozono	80
4.9.	El cambio global en el pasado	88
5.	Cambio climático	101
5.1.	¿Qué es el cambio climático?	101
5.2.	Incertidumbres	105
5.3.	Cambio climático: ¿realidad, futuro o especulación?	108
5.4.	Los cambios climáticos abruptos, una incógnita más de la evolución de nuestro planeta	113
5.5.	Impacto del cambio global sobre las zonas polares del planeta	122
6.	Escenarios de cambio global	131
6.1.	Escenarios climáticos	131
6.2.	Cambio global y ecosistemas	134
6.3.	Escenarios del cambio global	147
7.	El impacto social del cambio global	151
7.1.	El ecosistema social	151
7.2.	Áreas relevantes para la comprensión del impacto social del cambio global	154
7.3.	El impacto en la población como base demográfica: salud, estructura demográfica y flujos migratorios	154
7.4.	El impacto en la base económica de la sociedad: economía, usos del territorio y asentamientos humanos	160
7.5.	El impacto en la organización social: estructura social y política, conflictos, normas y valores sociales	166
7.6.	El impacto en el patrimonio histórico-natural. El papel de los espacios protegidos	170
7.7.	Perspectivas sociológicas	172

8. El impacto económico del cambio climático	177
8.1. Introducción	177
8.2. ¿Cuál es el impacto económico de un kilo de CO ₂ más en la atmósfera?	178
8.3. Nuestro conocimiento sobre los efectos económicos del cambio climático	180
8.4. Algunas reflexiones	188
9. Energía y CO₂	191
9.1. Nuestra relación de dependencia con la energía	191
9.2. 27.000 millones de toneladas de CO ₂ al año	192
9.3. Opciones reales de reducción de emisiones de CO ₂	196
9.4. La captura y almacenamiento de CO ₂ como transición hacia un sistema energético sostenible	197
10. ¿Cómo afrontar el cambio global? Mitigación y adaptación al cambio global	205
10.1. Cómo construir capacidad adaptativa frente al cambio global ...	206
10.2. El papel de la ciencia	209
10.3. El papel de las tecnologías	214
10.4. El papel de la política	218
10.5. El papel de la educación y la sensibilización ambiental	224
10.6. El papel de los medios de comunicación	227
10.7. El papel de los ciudadanos	233
10.8. El papel de lo imprevisible	236
10.9. Geoingeniería	237
11. Perspectiva	241
12. Enlaces recomendados	243
Sobre los autores	247



Concha de gasterópodo en el litoral de Jutland,
Dinamarca.

Fotografía: Dorte Krause-Jensen.

Agradecimientos

Agradecemos a Xavier Bellés la invitación a escribir la primera versión de esta obra; a Regino Martínez y a X.A. Padín, su ayuda en la compilación de datos; a Javier Bustamante, por los datos facilitados; a Iván López, Esther Lorenzo, Ángeles Yuste, X.A. Álvarez-Salgado, Beatriz Ramírez y Esteban Manrique por sus aportaciones y recomendaciones sobre el texto; a Eduardo López-Aranguren y Constanza Tobío, por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo; a Mariano Muñoz, director del Centro de Ciencias Medioambientales (CSIC), por su hospitalidad durante las sesiones de trabajo para escribir esta obra, y a Alicia Deza, por su magnífico trabajo en la edición y composición de este volumen.

Litoral sureste de Mallorca con el archipiélago de
Cabrera, parque nacional, al fondo.

Fotografía: C. M. Duarte.



Presentación

Como astrofísico que ha dedicado buena parte de su carrera a la exploración del Sistema Solar y las atmósferas de sus planetas, no dejo de maravillarme ante la singularidad que el planeta Tierra representa entre los varios centenares de planetas ya descubiertos, y que podríamos resumir en la abundancia de agua y la presencia de vida. Con todo, este carácter único no sería posible si el clima de la Tierra no estuviese situado justo en este estrecho margen de temperaturas (0 a 100°C) que permite la existencia de agua en fase líquida. Ese hecho no depende exclusivamente de la distancia del planeta Tierra al Sol, como fuente de calor, sino que depende decisivamente de la presencia de un envoltorio gaseoso, la atmósfera, con una composición gaseosa rica en gases de efecto invernadero que sitúan la temperatura promedio de la superficie de la Tierra en unos 15°C frente a los -18°C que tendría si la Tierra careciese de atmósfera. Sin embargo, la composición de la atmósfera terrestre es, a su vez, el resultado de la acción de la vida, que ha transformado completamente su composición gaseosa convirtiendo una atmósfera similar a la de Marte o Venus en la que hoy conocemos y que es una de las claves de la singularidad de nuestro planeta y la vida que éste alberga.

Casi 3.500 millones de años después de que la evolución de la vida en la Tierra generase la capacidad, a través del desarrollo de la fotosíntesis oxigénica, de modificar la atmósfera, un nuevo desarrollo de esta evaluación, la aparición de una especie inteligente, capaz de desarrollos tecnológicos, ha desencadenado de nuevo un cambio en la composición de la atmósfera, fundamentado en la capacidad de

esta especie de transformar el planeta a través de la utilización de la energía. El resultado más evidente es un cambio en el clima global, pero que está acompañado de una serie de cambios en la biosfera y que conjuntamente constituyen un cambio global ambiental. A diferencia de las cianobacterias, responsables de la transformación de nuestra atmósfera primitiva, los seres humanos estamos dotados de consciencia y la capacidad de anticipar, si bien con algunas limitaciones, las consecuencias de estas nuevas capacidades.

Esta consciencia incluye la constancia de nuestra dependencia de la naturaleza y nuestra responsabilidad en cuidarla para las generaciones futuras, consciencia reflejada en la sorprendente convergencia entre los pensamientos siguientes:

Trata bien a la Tierra: no te ha sido dada por tus padres; te ha sido prestada por tus hijos.

Proverbio Cachemir

No heredamos la Tierra de nuestros ancestros, la recibimos prestada de nuestros hijos.

Proverbio Kenyata

Debemos proteger el bosque para nuestros hijos, nietos y los niños no natos. Debemos proteger el bosque para aquellos que no pueden hablar por sí mismos, como los pájaros, los animales, los peces y los árboles.

Qwatsinas, Nación amerindia Nuxalk

De hecho, la capacidad de considerar generaciones futuras, miembros no natos de nuestra especie, es parte del hecho diferencial de nuestra especie. También lo es la capacidad, a través de la tecnología, de haber multiplicado nuestra capacidad de transformación y consumo, a través del uso de la energía, la capacidad de utilizar nuestro conocimiento para extender, hasta multiplicar por más de dos, nuestra esperanza de vida y la capacidad de utilizar la tecnología para reemplazar el lento proceso de la evolución y capacitarnos para generar decenas de miles de nuevos compuestos químicos que no están inscritos en nuestro genoma sino que hemos externalizado y desarrollado a través de la tecnología.

Estas capacidades y las enormes perspectivas para la mejora de nuestra calidad de vida que ofrecen se han utilizado sin plena conciencia de las consecuencias que, conjuntamente, tienen sobre la naturaleza y el funcionamiento del planeta Tierra, posiblemente porque la capacidad de contemplar el planeta como unidad funcional se ha adquirido recientemente a través del desarrollo de plataformas de observación como satélites y redes de sensores.

Estas observaciones han aportado evidencia inequívoca de que la actividad humana está afectando de forma profunda a la mayor parte de los procesos que, conjuntamente, determinan el funcionamiento de la biosfera que habitamos. Esta concienciación, junto con la consideración del posible incremento de estas perturbaciones en el funcionamiento del planeta Tierra conforman un desafío de proporciones colosales, que requieren del concierto de la comunidad científica, los líderes políticos y toda la sociedad.

Desde el Consejo Superior de Investigaciones Científicas asumimos plenamente este reto, que esperamos afrontar con la ayuda inestimable de nuestros colaboradores en la universidad, organismos de investigación y sector privado. A este fin hemos desarrollado un Eje de Investigación del Cambio Global, que reúne los esfuerzos de más de 500 investigadores en los distintos ámbitos del conocimiento en los que el CSIC investiga. Hemos puesto en marcha un Laboratorio Internacional de Cambio Global (www.lincg.uc-csic.es), con la Pontificia Universidad Católica de Chile, para tender puentes de colaboración en este ámbito con Iberoamérica. Hemos puesto en marcha, en asociación con la Universidad Internacional Menéndez Pelayo y con la colaboración de la Universitat de les illes Balears, un Postgrado en Cambio Global (<http://www.imedeia.csic.es/ICG/MasterCG/>) e impulsamos la investigación a escala planetaria, desde las zonas polares hasta las selvas tropicales. De hecho, el CSIC publicó, entre 1999 y 2008 más de 600 artículos científicos en el ámbito del cambio climático, ámbito al que contribuye con un 32% de toda la producción científica española.

Sin embargo, reconocemos que nuestros esfuerzos serán baldíos si no cuentan con la complicidad de la sociedad. El primer paso para despertar esta complicidad es conocer, pues sin conocimiento no puede haber reacción. Así pues, la obra que aquí presentamos persigue el objetivo de informar a la sociedad sobre qué es el cambio global, cuáles son sus motores, cuáles sus consecuencias y cómo podemos actuar, desde nuestras distintas responsabilidades, para mitigar y adaptarnos a estas

consecuencias. Para ello hemos contado con la colaboración de un equipo multidisciplinar de investigadores que han sabido aportar una visión integradora de esta importante cuestión.

Espero que la publicación de esta obra marque un punto de inflexión en el nivel de comprensión de la sociedad y su compromiso con este problema. Esta obra se acompaña de una importante actividad de divulgación, a través de conferencias, actos y participación en iniciativas ciudadanas, como “Rivas Sostenible”. Desde luego el organismo que presido volcará toda su capacidad en aportar el conocimiento necesario para tomar las decisiones oportunas para afrontar este desafío clave para la humanidad.

Madrid, 6 de noviembre de 2009.

RAFAEL RODRIGO
*Presidente del Consejo Superior
de Investigaciones Científicas*

1. Introducción

El cambio global y el cambio climático son problemas que han trascendido el ámbito de la investigación científica para percolar el tejido de la sociedad, hasta encontrarse recogidos en superproducciones de Hollywood (*El día después de mañana*, dirigida por Roland Emmerich), documentales de éxito (*Una verdad inconveniente*, dirigida por David Guggenheim a partir de un libro de Al Gore), *best-sellers* (*Estado de Miedo* de M. Crichton), modificar el diseño y coste de nuestras viviendas (e.g. mediante la futura regulación de dotación de energías renovables en los edificios), y nuestras opciones vitales (e.g. adquirir vehículos menos contaminantes, etc.). El cambio global y el cambio

climático son realidades instaladas definitivamente ente nosotros, no ya como problemas del futuro, como se han percibido hasta hace poco, sino como una realidad a la cual nos hemos de adaptar y un desafío al que hemos de responder.

Líderes mundiales coinciden en percibir en el cambio global y el cambio climático el mayor desafío de la humanidad, ya que no compromete únicamente a las personas que consciente o inconscientemente incidimos o atenuamos el problema con nuestras opciones personales y estilo de vida, sino que compromete, de forma particularmente aguda, a las generaciones futuras, nuestros hijos, nietos y sus descendientes.

contradicciones internas que los ciudadanos, los gestores públicos y el sector privado pueden verse confundidos, debilitando esta confusión su capacidad de responder y adaptarse al desafío que el cambio global plantea ya y seguirá planteando, con más fuerza, en el futuro.

El objetivo de este volumen es comunicar en un lenguaje claro y accesible sin abandonar el rigor científico que son el cambio global y el cambio climático, que relación tienen entre sí, cuáles son sus causas y consecuencias, cómo van a afectar a la sociedad, particularmente a la española, y qué podemos hacer para paliar estos impactos.





Fiordo en Nuuk, Groenlandia.
Fotografía: Dorte Krause-Jensen.

2. ¿Qué es el cambio global?

El término cambio global define el impacto de la actividad humana sobre el funcionamiento de la biosfera. Se incluyen en este término aquellas actividades que, aunque ejercidas localmente, tienen efectos que trascienden el ámbito local o regional para afectar el funcionamiento global del sistema Tierra. El cambio climático, uno de los componentes del cambio global, se refiere al efecto de la actividad humana sobre el sistema climático global, que siendo consecuencia del cambio global afecta, a su vez, a otros procesos fundamentales del funcionamiento del sistema Tierra. La interacción entre los propios sistemas biofísicos entre sí y entre éstos y los sistemas sociales, para amplificar o atenuar sus efectos, es una característica esencial del cambio global que dificulta la predicción de su evolución.

De hecho, el cambio es algo consustancial al planeta Tierra que, a lo largo de sus miles de millones de años de historia, ha experimentado cambios mucho más intensos que los que se avecinan. Incluso muchos de los cambios más importantes en la biosfera han estado forzados por organismos, como fue el paso de una biosfera pobre en oxígeno y con altas irradiaciones ultravioleta a una biosfera con un 21% de oxígeno y una capa de ozono que filtra los rayos ultravioleta, consecuencia del desarrollo de la fotosíntesis en bacterias. De hecho la palabra *cambio* en el término cambio global no se refiere a que los distintos componentes del funcionamiento de la biosfera, como pueden ser el clima o el ciclo del nitrógeno, hayan sufrido variaciones, lo que ha ocurrido durante la agitada historia del planeta Tierra. La palabra

cambio en el término cambio global hace referencia a que son *los propios mecanismos de regulación de la biosfera* los que han cambiado. Ejemplos de ello son, por ejemplo, la producción industrial de compuestos clorofluorocarbonados, los CFCs, compuestos sintéticos gaseosos que no existían de forma natural en el planeta Tierra, y cuya síntesis, producción masiva y liberación a la atmósfera causó en los años ochenta el agujero de ozono, además de ser compuestos climáticamente activos por su potente efecto invernadero. Igualmente, la aplicación masiva de la reacción de Haber, patentada en 1908 por Fritz Haber, que a partir del uso de energía y metano produce amoníaco para la producción de fertilizantes agrícolas a partir del nitrógeno atmosférico, ha modificado radicalmente el ciclo del nitrógeno en nuestro planeta siendo también una fuente importante de óxido nítrico, otro potente gas de efecto invernadero, a la atmósfera, como explicaremos en detalle más adelante. Es imposible evaluar el papel que los CFCs o la reacción de Haber han jugado en la regulación del clima, la capa de ozono, o el ciclo de nitrógeno durante los 4.000 millones de años de existencia del planeta antes de su introducción en el siglo XX, simplemente porque no existían.

De hecho las consecuencias del fenómeno del cambio global podrían

resumirse en la célebre frase del poeta francés Paul Valéry de que “el problema con nuestros tiempos es que el futuro ya no es lo que era”. El cambio de los mecanismos de regulación de la biosfera que representa el cambio global supone un desafío de proporciones colosales en el que lo que hayamos podido aprender de perturbaciones pasadas en la historia de la Tierra resulta de utilidad limitada para predecir lo que nos espera en el futuro. El dogma de las geociencias de que el pasado es la clave del futuro entra en colisión frontal con esta nueva situación en la que la introducción de nuevos mecanismos y procesos de regulación viola la infalibilidad de este principio.

Hay dos características adicionales del cambio global que hacen que los cambios asociados sean únicos en la historia del planeta: 1) la rapidez con la que este cambio está teniendo lugar, con cambios notables (e.g. en concentración de CO₂ atmosférica) en espacios de tiempo tan cortos para la evolución del planeta como décadas; 2) el hecho de que una única especie, el *Homo sapiens* es el motor de todos estos cambios.

2.1. La marea humana

Las claves del cambio global en el Antropoceno se han de buscar en la conjunción de dos fenómenos relacionados: el rápido crecimiento de

la población humana y el incremento, apoyado en el desarrollo tecnológico, en el consumo de recursos per cápita, que resulta en un fenomenal aumento en el uso de recursos naturales por la humanidad.

El crecimiento de la humanidad es un proceso imparable desde la aparición de nuestros ancestros en el planeta, hace aproximadamente un millón de años, hasta alcanzar una población que ya supera los 6.700 millones de habitantes (figura 2.1). La reconstrucción de la evolución de la población humana (Cohen, 1995) muestra un crecimiento exponencial sostenido durante casi un millón de años, con un despegue particularmente notable desde el siglo XVIII (figura 2.1), un hecho que posiblemente no tenga parangón en la historia de la vida en el planeta, salvando aquellas especies (e.g. trigo, arroz, perros, ratas, patógeno humano), asociadas al ser humano. Las previsiones de Naciones Unidas indican que este crecimiento continuará para alcanzar un techo situado en torno a 10.700 millones de habitantes hacia finales de este siglo, estabilizándose en torno a esta cifra (figura 2.1) debido a cuestiones sociales, como la extensión de la capacidad de las mujeres de planificar su descendencia.

Sin embargo, el tamaño de la población humana no está regulado únicamente por aspectos sociales y educativos, sino que existen límites a la

población derivados del carácter finito de los recursos naturales de los que dependemos. El crecimiento de la población humana conlleva un aumento de los recursos, alimento, agua, espacio y energía consumidos por la población humana. Dado que los recursos del planeta Tierra son finitos, es evidente que ha de existir un techo a la población humana. La primera voz de alarma en cuanto al crecimiento incontrolado de la población humana fue la del demógrafo británico Thomas R. Malthus, quien en su obra *Un ensayo sobre el principio de la población* (1798) predijo que la población humana excedería la capacidad de producir alimento. De hecho existen registros mucho más antiguos que alertan de los peligros de la sobrepoblación humana, destacando entre ellos la *Épica Atrahasis babilónica*, transcrita alrededor del 1600 a.C. Esta preocupación ha llevado a muchos investigadores a realizar cálculos de la capacidad de carga de la población humana del planeta o el número máximo de personas que el planeta puede soportar. La mayor parte de estas estimas oscilan entre 7.000 y 12.000 millones de habitantes (Cohen, 1995), con un valor mediano cercano a los 9.500 millones de habitantes, cifra a la que se aproximan mucho las proyecciones demográficas para el siglo XXI (figura 2.1).

La producción global de alimento viene condicionada por dos factores: la



disponibilidad de terreno agrícola y la disponibilidad de agua. La disponibilidad de terreno agrícola ha venido aumentando rápidamente por la transformación de bosques y otros ecosistemas a campos de cultivo y pastizales, uno de los motores del cambio global. Sin embargo, la tasa de incremento en el área del 0,24% anual

Seta en un bosque de coníferas de Québec, Canadá.

Fotografía: C. M. Duarte.



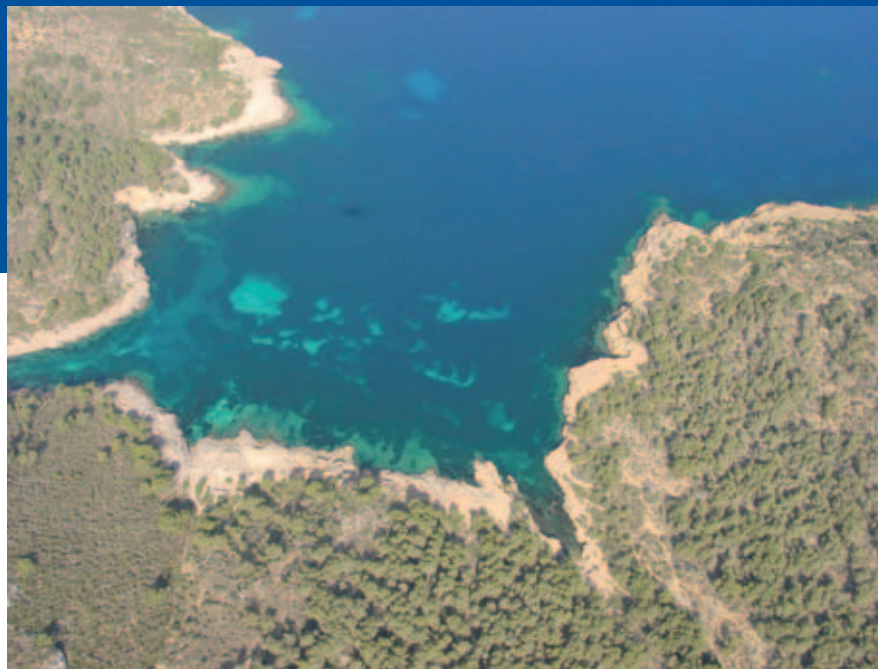
Flores en el litoral de Las Cruces, Chile.
Fotografía: C. M. Duarte.

es más lenta que la tasa de incremento de la población humana, superior al 2% anual, lo que supone que el área de cultivo per cápita ha venido decayendo. Mientras que el área de cultivos global per cápita era de cerca de 0,23 ha por habitante en 1950, el área de cultivos per cápita era de 0,10 ha por habitante en el año 2000 y el departamento de Agricultura de EE.UU. calcula que será de 0,07 ha por habitante en el año 2050. Aunque la aplicación masiva de fertilizantes consiguió aumentar el rendimiento de los campos agrícolas entre 1950 y el año 2000, de forma que la producción de alimento per cápita no se redujo, el margen para aumentar el rendimiento de las cosechas es ya muy reducido, por lo que la reducción en área de cultivo per cápita en el futuro pone en riesgo el suministro de alimento. Además, algunos analistas opinan que se ha alcanzado el techo máximo en el área global dedicada a la agricultura, porque los suelos que quedan por transformar en campos agrícolas son, en general, suelos muy poco fértiles y vulnerables a la desertificación, y porque este proceso junto con la transformación de suelo agrícola para otros usos (e.g. industrial, urbano) conllevan suficientes pérdidas de área de cultivos como para compensar las posibles ganancias.

El segundo cuello de botella es la disponibilidad de agua, que se considera el cuello de botella último

Cala Santa María, en la isla de Cabrera,
Islas Baleares.

Fotografía: C. M. Duarte.



a la población humana, y que afecta ya a un tercio de la población humana, la cual no tiene acceso a suficientes recursos hídricos para cubrir saludablemente sus necesidades. El ciclo del agua mueve anualmente unos 40.000 km³ de agua, de los que aproximadamente un máximo de entre 9.000 y 14.000 km³ se encuentra disponible para su uso por la humanidad, que ya utiliza más de 5.000 km³ (Shiklomanov, 1993).

Considerando, de forma conservativa, que las necesidades mínimas de agua suponen cerca de 900 m³ por persona y año (Shiklomanov, 1993), la cantidad de agua disponible para su uso por la humanidad supone que la población máxima sustentable en el planeta Tierra se sitúa entre los 8.000 y 12.000 millones de habitantes. De hecho, este rango es aproximadamente el rango de estimas de la capacidad de carga de población humana del planeta Tierra que se han derivado de cálculos mucho más sofisticados (figura 2.1, Cohen, 1995). Todos ellos se han de considerar cálculos relativamente

optimistas, pues asumen que todo el agua disponible para la humanidad se puede utilizar para producir alimento, cuando casi un 30% del uso actual de agua se dedica a usos industriales y municipales, y porque asumen que tanto la población como los recursos hídricos están distribuidos de forma uniforme, de manera que todos los humanos tenemos acceso a los mismos recursos hídricos.

Aceptando estas estimas como válidas, la trayectoria de crecimiento de la población indica que la población humana alcanzará en la próxima década un tamaño

equivalente a las estimas más bajas de la máxima población humana posible y que en el año 2050 se habrá alcanzado una población equivalente a la que el promedio de los distintos cálculos sitúa como la población humana máxima posible sustentable sobre el planeta Tierra (figura 2.1). Es evidente que la humanidad está a punto de entrar en una etapa en nuestra historia, caracterizada por la penuria de recursos naturales (agua, terreno agrícola, alimento) esenciales, que sólo se había experimentado antes a nivel local por nuestra especie. Nuestra sociedad se debe preparar para afrontar

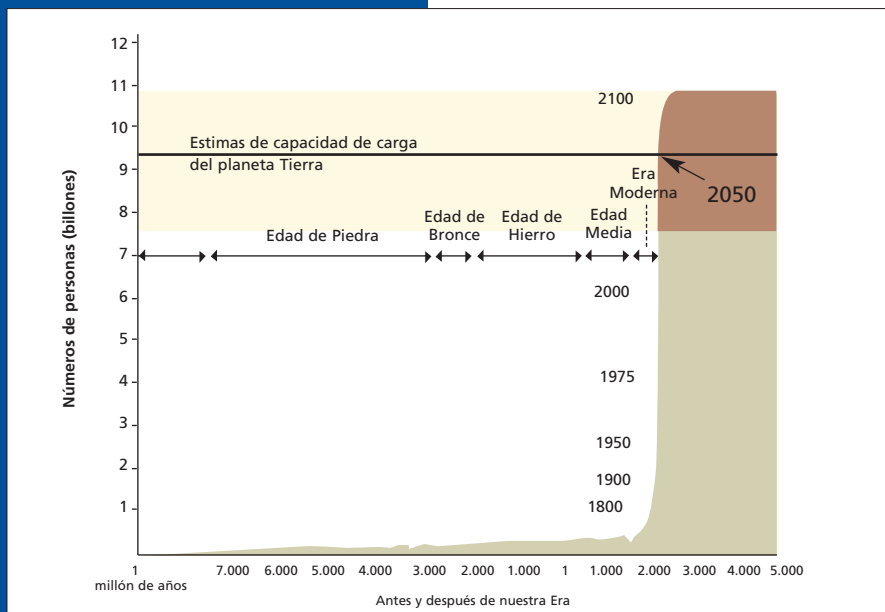


Figura 2.1. Reconstrucción del crecimiento de la población humana desde la aparición de nuestros ancestros hace un millón de años hasta el presente y previsión de Naciones Unidas del crecimiento futuro de la población humana. La banda amarilla muestra el rango de las distintas estimas de la población máxima que el Planeta puede soportar y la línea horizontal hacia el centro de la franja muestra el valor mediano de estas estimas.

Fuente: Cohen, 1995.

esta situación en la que el desarrollo del conocimiento científico y tecnológico, junto con una nueva ética global en nuestra relación con los recursos naturales, han de jugar necesariamente un papel fundamental.

Cambio global y el Antropoceno

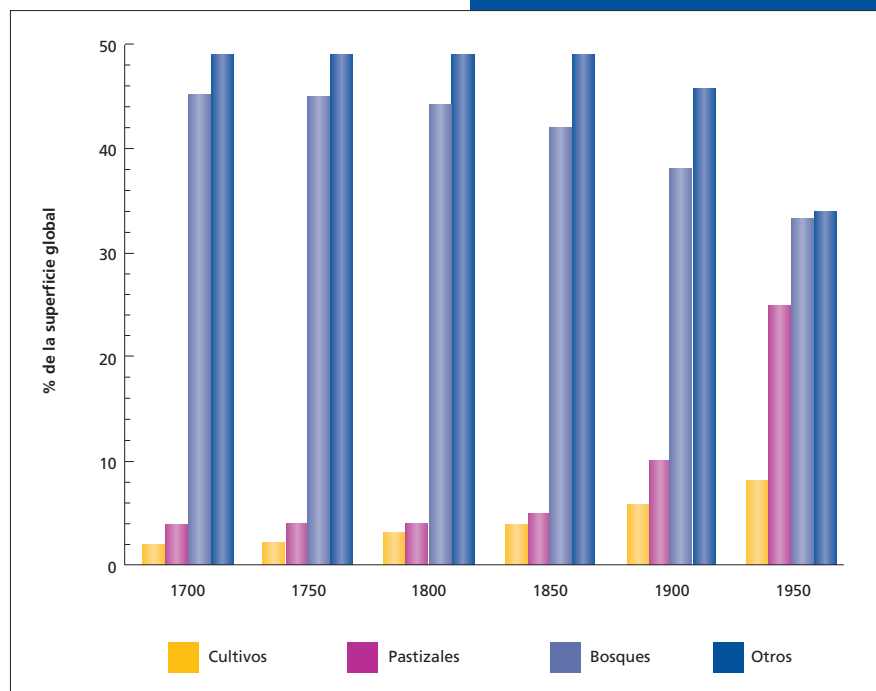
Las características específicas del cambio global han llevado a proponer el término Antropoceno para referirse a la etapa actual del planeta Tierra. El Antropoceno es un término propuesto en el año 2000 por el químico

atmosférico y premio Nobel Paul Crutzen junto a su colega E. Stoermer para designar una nueva era geológica en la historia del planeta en la que la humanidad ha emergido como una nueva fuerza capaz de dominar los procesos fundamentales de la biosfera (Crutzen y Stoermer, 2000). Como veremos, éste es el caso del clima, donde los análisis de atribución recientes demuestran, más allá de cualquier duda razonable, que desde 1960 la actividad humana actúa como fuerza dominante de modificación del clima a escala planetaria, sobreponiéndose al efecto de las fuerzas (e.g. actividad volcánica, actividad solar) que han venido dominando la variación climática en el pasado.

El crecimiento de la población humana es, sin duda, un componente fundamental de la creciente influencia de nuestra especie sobre los procesos que regulan el funcionamiento de la biosfera. Sin embargo, el crecimiento de la población ha ido acompañado de un rápido incremento en el consumo per cápita de recursos tales como territorio, agua y energía. El consumo de territorio ha supuesto una conversión de ecosistemas sin perturbar, que la humanidad ha usado y usa como recolectores, a ecosistemas domesticados como pastizales o campos de cultivo, o ecosistemas totalmente antropizados como zonas urbanas. La transformación del territorio es un proceso que se inició

con el desarrollo de la agricultura, hace unos 10.000 años, pero que se ha acelerado tras la Revolución Industrial, con el aumento explosivo de la población humana y el desarrollo de maquinaria pesada capaz de transformar grandes superficies en plazos cortos de tiempo. Desde 1700 hasta el presente la superficie domesticada ha aumentado de un 6% a un 40% de la superficie terrestre, con un dominio de la conversión a pastizales (Goldewijk & Battjes, 1997). El rápido crecimiento de zonas urbanas supone aún una pequeña fracción del territorio transformado, ya que las áreas urbanas ocupan aproximadamente un 2% del territorio del planeta (Goldewijk & Battjes, 1997; figura 2.2 territorio transformado).

El consumo de agua se incrementó por un factor de 10, pasando de unos 600 a más de 5.200 km³ anuales durante el siglo XX, a lo que contribuyó el aumento del consumo per cápita de agua desde 350 a 900 m³ anuales (Shiklomanov, 1993). Este incremento tiene múltiples componentes, incluyendo los cambios en la dieta con un aumento del consumo de carne, que requiere más agua para el mismo aporte calórico que una dieta vegetariana, el desarrollo a fines del siglo XIX de infraestructuras sanitarias que utilizan agua para impulsar los residuos y la migración de la población a zonas urbanas, donde su



consumo de agua se duplica. Finalmente, el uso de energía per cápita se ha multiplicado por 15 desde la Revolución Industrial (figura 2.3), con el desarrollo del transporte y la extensión de la climatización de los espacios habitados. Estas cifras globales de incremento del uso de territorio, agua y energía per cápita ocultan enormes desequilibrios regionales, con oscilaciones que varían diez veces desde los países cuyos ciudadanos consumen más recursos (Canadá y EE.UU.) a los países cuyos ciudadanos apenas

Figura 2.2. Territorio transformado. Progresión de la transformación de la superficie global de bosques y otros ecosistemas naturales a pastizales y campos de cultivo. La superficie urbana está en torno al 2% de la superficie terrestre global.

Fuente: Datos de Goldewijk & Battjes, 1997.

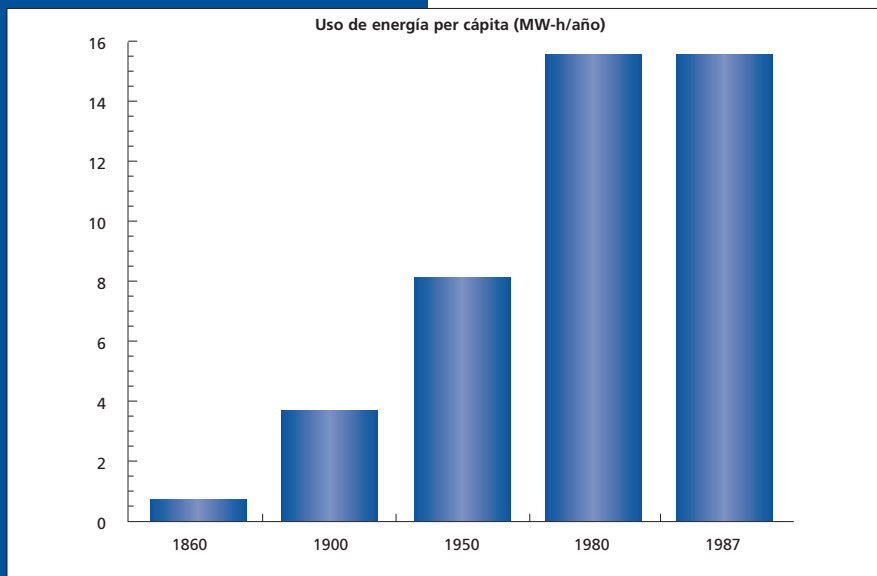


Figura 2.3. Estimaciones de consumo de energía per cápita.

Fuente: Cohen, 1995.

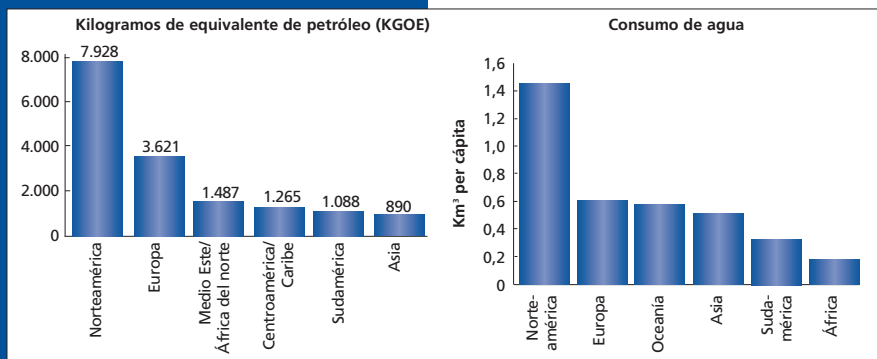


Figura 2.4. Distribución del consumo per cápita de energía y agua en distintas áreas geográficas.

Fuente: World Resources Institute.

alcanzan niveles mínimos de subsistencia en el uso de agua, alimento y energía, típicamente ubicados en Asia y África (figura 2.4). Estos desequilibrios reflejan no sólo diferencias geográficas en la disponibilidad de recursos, sino, principalmente, diferencias en estilos de vida. La desigual distribución de consumo de recursos en la tierra es incluso visible desde el espacio, en las impactantes fotografías nocturnas de la Tierra de la NASA que reflejan la combinación del binomio densidad de población y consumo de energía per cápita (figura 2.5).

La presión total de la humanidad sobre los recursos del planeta se puede computar, de manera simplificada, como el producto del tamaño de la población y el consumo per cápita de recursos, de forma que es posible calcular que esta presión se ha multiplicado por un factor de entre diez y quince veces en total desde la Revolución Industrial, con un peso similar del incremento de la población y el aumento del consumo per cápita en ese aumento. El imparable incremento del consumo total de recursos, que avanza a un ritmo mucho mayor que el incremento de la población, supone que la capacidad de carga del planeta se alcanzará a un nivel de población global más reducido de lo previsto en los cálculos anteriores, dado que los



individuos de los países más consumistas tienen un peso desproporcionado —equivalente al consumo de diez ciudadanos de países pobres— sobre el consumo de recursos. Por otro lado, los cambios que este consumo de recursos generan sobre el funcionamiento de la biosfera, que se detallan a lo largo de esta obra, afectan a su vez al uso de recursos por la humanidad. Es evidente que el consumo de recursos por la humanidad no es la causa inmediata de que cambien el clima o se extingan especies, sino que desencadena una serie compleja de mecanismos, que interactúan entre sí, y

que devienen en los cambios que estamos constatando en el planeta.

El que el crecimiento del uso de recursos por la humanidad tenía, necesariamente, un límite en el siglo XXI no es un descubrimiento reciente. Hace casi cuatro décadas el Club de Roma puso en marcha un estudio para evaluar los límites del crecimiento, el libro titulado, en español, *Los límites al crecimiento*, escrito por Meadows y otros autores en 1970, presentaba los resultados de un modelo que predecía las distintas fases del agotamiento de los recursos naturales y anticipaba un declive de la sociedad acompañado de un fuerte aumento de la contaminación

Figura 2.5. Imagen nocturna del planeta Tierra el 27 de noviembre de 2000. La imagen fue generada por C. Mayhew y R. Simmon (NASA/GSFC) a partir de cientos de imágenes de los satélites DMSP.



Pradera de la angiosperma marina *Cymodocea nodosa* en el litoral del Algarve, Portugal.

Fotografía: A. Cunha.

a partir del año 2030 (Meadows *et al.*, 1972). Las predicciones no se han desviado en mucho de las tendencias observadas.

Los recursos fundamentales que se están consumiendo en exceso son la energía, el agua, el territorio, la biodiversidad (pesquerías, plantas y animales para aplicaciones en agricultura, ganadería, acuicultura, ornamentación, cosmética, medicina, biotecnología, etc.), los elementos

fundamentales para la vida (nitrógeno, fósforo, hierro, entre otros), y los compuestos sintéticos que distintos sectores de la actividad humana (industria, cosmética, alimentación, farmacéutica, etc.) han introducido en el medio ambiente (figura 2.6). El uso de estos recursos genera impactos de escala global, como son el cambio climático, la desertificación, la destrucción de la capa de ozono, la pérdida de biodiversidad, y la pérdida de calidad de aguas, suelos y atmósfera (figura 2.6).

Una característica fundamental del proceso de cambio global es que tanto motores como consecuencias están enlazadas por una trama de interacciones que imposibilita diseccionar esta red de interacciones en procesos más sencillos. Los intentos de reducción del problema de cambio global a sus componentes individuales, ignorando las interacciones entre ellos, han sido causa de no pocos errores. El cambio climático, componente que, sin ser necesariamente el más importante o más dañino del cambio global, domina las agendas políticas y mediáticas, es un ejemplo de discurso reduccionista. En la mayor parte de discursos políticos y mediáticos se identifica el cambio climático con un problema derivado del uso de combustibles fósiles como fuente de provisión de energía y se obvia que otros componentes del cambio global,

como la transformación del territorio, incluidos los fuegos forestales, la aplicación de fertilizantes, fuente de óxido nitroso a la atmósfera, y la ganadería, fuente de metano a la atmósfera, generan fuertes emisiones de gases de efecto invernadero. El carácter enlazado del cambio global queda suficientemente ilustrado usando dos ejemplos. La emisión de CFCs, gases sintéticos utilizados en procesos de refrigeración, causaron la destrucción parcial de la capa de ozono, con un aumento de la radiación ultravioleta. Sin embargo, el ozono es un potente gas de efecto invernadero, y la aparición del agujero de ozono sobre la Antártida ha enfriado la troposfera en casi 7°C, causando la modificación de los vientos zonales a latitudes altas en el Hemisferio Sur.

El carácter entrelazado del cambio global también afecta, de manera particular, la toma de decisiones, que debe considerar todas sus dimensiones y evitar simplificar el problema. Un segundo ejemplo lo encontramos en la producción de biocombustibles. La necesidad de buscar fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles para reducir los riesgos asociados al cambio climático han impulsado numerosas propuestas. En los últimos años la Unión Europea y Estados Unidos apostaron por los biocombustibles, presentados como una piedra filosofal capaz de aliviar el

problema a la vez que generaba carambolas políticamente rentables, como un aumento de los subsidios a los agricultores y a las empresas transformadoras, no por producir alimento sino por producir combustible. Esta apuesta resultó ser un lodazal de arenas movedizas pues ha ayudado a llenar los depósitos de nuestros coches a costa de vaciar, aún más, los estómagos de los más pobres. ¿Cómo ha podido la apuesta por los biocombustibles fracasar en tan sólo un año? El fallo en este planteamiento fue el análisis del cambio climático como un problema acotado, sin identificar las conexiones entre el uso de energía y el uso de otros recursos limitantes, como el agua, el territorio o el nitrógeno, que componen un escenario de cambio global en el que la actividad humana afecta a múltiples procesos en la biosfera, que interactúan entre sí.

Los biocombustibles utilizan la energía solar para, a través del proceso de fotosíntesis, producir aceites y azúcares vegetales de alto rendimiento energético. El uso de biocombustibles no es algo nuevo sino que es algo tan antiguo como el uso de la leña, que aún reporta el 94% de la energía a la población rural africana. Brasil lleva décadas impulsando una fracción importante de su parque móvil con alcohol derivado de plantaciones de caña de azúcar. La producción de



Hinojo marino en la costa norte de Menorca.

Fotografía: C. M. Duarte.



Aerogeneradores en el Parque Natural del Estrecho de Gibraltar.

Fotografía: F. Valladares.

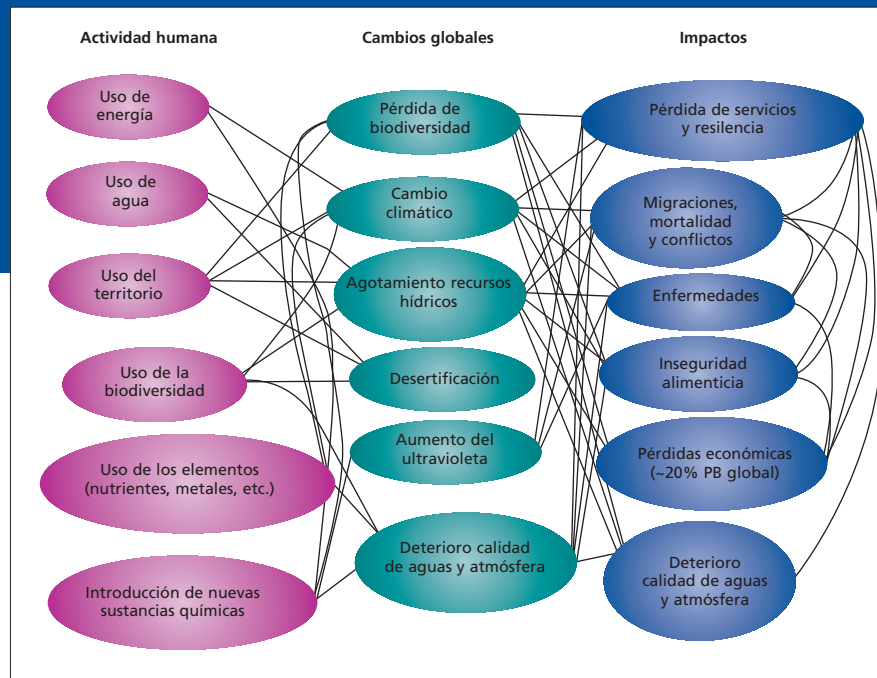
biocombustibles en Europa tampoco es nueva: la producción de biodiésel en la Unión Europea aumentó más de 40 veces entre 1993 y 2006 (0,08 a 5 millones de toneladas) mientras que en EE.UU. la producción de etanol recibe subsidios desde 1978.

Una primera causa de la cadena de problemas asociada al uso de biocombustibles es económica: la producción de biocombustibles, que recibe importantes subsidios directos e

indirectos (3.700 millones de euros en 2007 en la Unión Europea y 5.700 millones de euros en EE.UU. en 2005) genera más beneficios con el aumento del precio del petróleo que su uso para alimentación. La producción de biocombustibles genera más beneficios que la venta de excedentes en el mercado internacional de cereales, que no puede acomodar un aumento similar en los precios sin que la demanda colapse, pues los grandes importadores (e.g. Egipto) son países pobres que difícilmente pueden competir con el mercado de biocombustibles. Los modelos económicos indican que la producción de biocombustibles se incrementaría de forma proporcional al incremento del precio de petróleo, que parece encaminada a seguir aumentando en el futuro. El uso de biocombustibles ha conseguido el perverso efecto de vincular la economía del petróleo a la de los alimentos.

La producción de biocombustibles requiere mucho más que luz solar: agua, tierra fértil, fertilizantes y pesticidas. La agricultura es el sector que más agua consume, pues producir el alimento que cada uno de nosotros consume requiere entre 3.000 y 4.000 litros de agua diarios, de forma que la disponibilidad de agua es un factor limitante para la producción de alimento. La superficie de cultivo por habitante se ha reducido a escala global a la mitad entre 1960 y 2000 y la

Figura 2.6. Esquema indicando la trama de interacciones entre el consumo de recursos por la humanidad, cambios de escala global y sus impactos sobre la población humana que constituyen el proceso de cambio global.



reserva de suelo potencialmente fértil aún por utilizar para agricultura es cada vez más escasa.

La limitación de estos dos recursos básicos para la producción de alimento, agua y terreno fértil, se continuará agravando impulsada por el binomio de una creciente población humana y un incremento en el uso de alimento per cápita, particularmente en el consumo de carne, el componente que más recursos consume. En este contexto los biocombustibles se producen no además, sino a costa de los productos agrícolas para la alimentación. Esto es así no sólo porque las especies que dominan la producción de biocombustibles (e.g. maíz, soja, palma) se usan también para la alimentación, puesto que muchas de las especies alternativas consumirían agua y territorio fértil. La superficie dedicada a producción de biocombustibles en la Unión Europea aumentó casi diez veces en tres años, de 0,3 millones de ha en 2004 a 2,8 millones de ha en 2007. Aunque la producción de biocombustibles consume una

proporción modesta de la producción de cereales y es responsable de tan solo un 10% del incremento de su precio, este incremento agudiza la tendencia al aumento del precio de los alimentos derivados del progresivo deterioro del equilibrio entre la producción y demanda global de alimento.

Los beneficios ambientales asociados a la producción de biocombustibles son escasos, mientras que los problemas que generan sobre el medio ambiente abundan. La capacidad de limitar las emisiones de gases de efecto invernadero a partir de la producción de biocombustibles es marginal pues la

producción y utilización de biocombustibles requiere de una importante cantidad de energía, de forma que los biocombustibles generan, en el mejor de los casos, un 20% más de energía que la que se emplea en su producción. La aplicación de fertilizantes, usados para la producción de biocombustibles, no sólo es un proceso energéticamente costoso sino que produce importantes daños ambientales, como la emisión de óxido nítrico, un gas de efecto invernadero mucho más potente que el CO₂, y la contaminación de nuestros ríos y costas por un proceso llamado eutrofización, o

exceso de producción de materia orgánica, un problema de dimensión global. La producción de biocombustibles impulsa la transformación del territorio y es ya hoy la principal causa de deforestación en Brasil, Indonesia, e incluso en Myanmar.

El incremento de uso de recursos de la biosfera por la humanidad plantea una serie de cuestiones fundamentales tales como: ¿cómo ha afectado el aumento del uso de recursos por la

humanidad al clima?, ¿cómo ha afectado al funcionamiento de la biosfera?, ¿cómo ha afectado a los ecosistemas?, ¿cómo repercuten estos cambios sobre la sociedad?, ¿se puede predecir la evolución de estos efectos en el futuro?, ¿podemos adaptarnos y paliar los impactos de estos cambios? Estas cuestiones, fundamentales para nuestra sociedad, no pueden encontrar respuesta en una disciplina particular de la ciencia, requiriendo el concurso de la

práctica totalidad de las ciencias naturales así como las ciencias sociales, lo que da idea del carácter transversal de la problemática del cambio global. El texto que sigue tiene por objeto atender a estas cuestiones presentando sin ambages datos objetivos, escenarios posibles y las incertidumbres que pueden afectarles, para concluir con una discusión de cómo el lector puede jugar un papel en paliar los problemas que aquí se exponen.

Referencias

COHEN, J. E. (1995). *How many people can the Earth support?* Norton, Nueva York.

CRUTZEN, P. J., y E. F. STOERMER. (2000). The "Anthropocene". *Global Change Newsletter*. 41: 12-13.

MALTHUS, T. R. (1978). *Un Ensayo sobre el Principio de la Población*. Oxford's Word Classics, 1993. Oxford.

UNITED NATIONS (2003). Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, World Population Prospects: The 2004 Revision and World Urbanization Prospects: The 2003 Revision. <http://esa.un.org/unpp>.

3. La maquinaria de la biosfera

Los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en el sistema Tierra están conectados entre sí y entre la Tierra, océano y atmósfera. La maquinaria de la biosfera ha venido funcionando dentro de dominios caracterizados por límites bien definidos y patrones periódicos. Sin embargo, este funcionamiento está siendo perturbado como consecuencia de la actividad humana.

Para poder entender mejor la “maquinaria” de la biosfera hay que observarla desde el punto de vista del clima, del ciclo del agua y de los elementos y del papel que juegan los organismos que se van a ver afectados por las perturbaciones antropogénicas.

3.1. Los motores del clima

No es fácil definir de una forma precisa lo que es el clima de la Tierra, y menos en una obra como la presente. Desde un punto de vista físico podemos decir que es el estado del sistema climático (atmósfera, hidrosfera, litosfera, criosfera y biosfera), o sea, nuestro planeta, cuando resulta forzado por la energía que proviene del Sol.

El clima queda caracterizado por las condiciones ambientales (principalmente temperatura y precipitación, aunque no sólo) en intervalos de tiempo largos. Es importante remarcar que el intervalo de tiempo debe ser largo, pues



Montaña de sal marina en la salina de la Colonia de San Jordi, Mallorca.

Fotografía: C. M. Duarte.

considerando alcances temporales cortos (digamos de unos pocos días) nos estaríamos refiriendo al tiempo meteorológico y no al clima.

Aunque el sistema bajo estudio sea el mismo y las variables implicadas también, los métodos empleados para el estudio de tiempo y clima son diferentes.

En la caracterización referida anteriormente, es importante dejar constancia del interés en conocer, no sólo los valores medios de las variables consideradas, sino su variabilidad, tanto espacial como temporal. Quiere esto

decir que es importante ser consciente de que diferentes lugares geográficos tienen climas diferentes (lo cual parecería una evidencia), pero también que, en un lugar concreto, la caracterización ambiental a la que nos estamos refiriendo puede ser diferente en el transcurso de los años (por ejemplo, las primaveras actuales y las primaveras de nuestra infancia).

El hombre recibe sensorialmente a través de la atmósfera la percepción del clima. Afortunadamente esto es así porque, gracias a eso, la ciencia ha desarrollado instrumentos para sustituir a nuestros sentidos y se han archivado, desde hace cientos de años, resultados de medidas instrumentales que ahora nos resultan muy útiles. Mediante un tratamiento estadístico adecuado de series largas de variables meteorológicas se puede deducir información de los valores medios y de la variabilidad espacio-temporal a la que anteriormente se hacía referencia.

Todos los procesos que se dan en nuestro planeta son posibles gracias a la energía que procede del Sol en forma de radiación electromagnética. Sin embargo, el clima queda determinado por un buen número de causas, tanto externas a la Tierra como internas. Estas causas, además, son cambiantes en el transcurso del tiempo, lo que hace que su reajuste para establecer el clima

sea complejo y sea entonces razonable pensar que el clima resultante no tenga porqué ser algo inalterable. En realidad se sabe que el clima de la Tierra ha sido en el pasado diferente al actual (piénsese, por ejemplo, en las eras geológicas, con la alternancia de glaciaciones y periodos interglaciares) y será también distinto en el futuro. Una buena parte de esas causas son naturales, pero no todas. Si se atiende a una división como la indicada más arriba, se tendrían:

a) Causas externas (al sistema climático)

- Actividad solar, incluidas las manchas solares. Afecta a la propia fuente de energía, por lo tanto, a la radiación que finalmente se recibe en la cima de la atmósfera, que sería como el combustible del motor que representaría el sistema climático. Se sabe que el Sol manifiesta ciclos en su actividad pero, por el momento, no se conoce cómo el sistema climático respondería a ellos produciendo finalmente cambios en el clima.
- Movimiento relativo Tierra-Sol. La Tierra describe una trayectoria elíptica alrededor del Sol cuya excentricidad cambia en el transcurso del tiempo con una periodicidad de unos

100.000 años. Esto hace que la Tierra se encuentre a una distancia del Sol que no va siendo igual año tras año al recorrer su órbita, que además es cambiante. También la inclinación del eje del mundo con respecto al plano de la trayectoria (oblicuidad) es variable, lo que hace que, como si la Tierra fuera una gran peonza, la prolongación de su eje de rotación señale puntos diferentes de la cúpula celeste, con ciclos de alrededor de 41.000 años. Por otra parte, la elipse orbital cambia de orientación en el espacio, dando lugar a lo que se llama precesión de los equinoccios. Esto hace que las estaciones astronómicas se den en diferentes lugares de la órbita con periodicidades aproximadas de 19.000 y 23.000 mil años. El resultado final es que, aunque la energía emitida por el Sol fuera constante, la energía incidente en el sistema es diferente y, además, se distribuye de forma diferente sobre la superficie del planeta. Lo anterior constituye la llamada teoría de los ciclos de Milankovitch, que permite explicar, junto con algún mecanismo interno, la sucesión glacial-interglacial de las eras geológicas, anteriormente indicadas.

- Impacto de meteoritos o cometas. Corresponde ésta a una causa bien

diferente de las anteriores. Se trata de algo difícilmente predecible, pero de consecuencias importantes si el tamaño del bólido es suficientemente grande. Su impacto contra la superficie del planeta puede originar una nube de polvo y/o de agua de tal magnitud que la radiación solar incidente no alcance el suelo con la intensidad que lo hacía antes del impacto. En esas condiciones, la temperatura puede descender de una forma apreciable, dando lugar a un cambio en el clima. La extinción de algunas especies, entre ellas los dinosaurios, en el llamado límite KT, parece que tuvo este origen.

b) Causas internas (al sistema climático)

- Efecto invernadero. Parte de la radiación que proviene del Sol, aproximadamente un 30%, es reflejada hacia el espacio. Con el resto, si la Tierra no dispusiera de atmósfera, la superficie del planeta se encontraría a una temperatura media de -18°C , justo la necesaria para mantener el balance de radiación. La Luna, que no posee atmósfera, se encuentra a una temperatura media como la indicada; sin embargo, en la Tierra las cosas son radicalmente





diferentes. Los constituyentes atmosféricos absorben relativamente poca radiación solar (sobre todo en ausencia de nubes) pero son muy absorbentes para la radiación infrarroja que emite la Tierra y la propia atmósfera. En consecuencia se produce un calentamiento en las capas bajas de la atmósfera, que modifica el balance de radiación, alcanzando una temperatura media de 15°C al nivel de la superficie. Este comportamiento de la atmósfera, radiativamente diferente para la radiación solar que para la terrestre, recibe el nombre popular de efecto invernadero, ya que guarda cierta semejanza con el comportamiento de esa estructura. El principal responsable del efecto invernadero es el vapor de agua (aproximadamente en un 80% del efecto total) y el segundo, a bastante distancia, el dióxido de carbono (CO₂). El efecto invernadero es decisivo en el clima que posee el planeta, ha permitido la vida, al menos en la forma que la conocemos, y cualquier modificación en dicho mecanismo alteraría el clima.

- Desigual distribución del balance de energía. Aunque el planeta en su conjunto se encuentra en

equilibrio de radiación, ese equilibrio no se da en cada lugar. En latitudes bajas, hasta unos 35° de latitud en cada hemisferio, es mayor la radiación solar absorbida por el sistema que la radiación infrarroja emitida hacia el espacio. Por el contrario, en el resto predomina la radiación emitida sobre la absorbida, existiendo entonces allí un déficit de energía. La tendencia natural a balancear los desequilibrios se lleva a cabo por medio de los dos fluidos de la Tierra (atmósfera y océanos), aunque la reducción total no se produce. Un cambio en la distribución del balance de energía (por ejemplo, debido a los parámetros orbitales) alteraría los sistemas mundiales de vientos y corrientes marinas.

- Dinámica interna del sistema (vientos, corrientes, realimentaciones...). La atmósfera y el océano, por medio de vientos y corrientes marinas, tienden a reducir la diferencia entre el *input* neto de energía en latitudes bajas y el déficit en latitudes altas. Los vientos y corrientes marinas son componentes muy importantes de los climas mundiales. Sin embargo, una vez establecidos los flujos de los fluidos, sus efectos múltiples

actúan sobre las causas que los producen, en una especie de ciclos sin fin. Estos procesos reciben el nombre de realimentaciones y son una característica de lo que se llaman efectos no lineales, de los que el sistema climático posee en abundancia. Cuando muchos de estos procesos de realimentación actúan simultáneamente, como ocurre en el sistema climático, resulta muy difícil saber con detalle el resultado, aunque es evidente que existe. Una de las pocas posibilidades de tratar este problema es mediante la simulación numérica de dichos procesos.

- Cambio de la composición atmosférica. El efecto invernadero es consecuencia de la absorción diferente de la radiación solar y terrestre por la atmósfera. Esta absorción se ejerce por parte de los gases que la constituyen y también las partículas que se encuentran en suspensión en el aire. Cualquier cambio en la composición atmosférica, o en la concentración de sus componentes, altera las propiedades de absorción y, en

consecuencia, el efecto invernadero. Desde que la Tierra es Tierra, la composición de la atmósfera ha sido cambiante. Ahora predominan nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2), aunque los contribuyentes mayores al efecto invernadero son el vapor de agua (cuya concentración no supera el 4% en volumen de la atmósfera) y el CO_2 (con una concentración mucho menor, en la actualidad del orden de unas 380 ppm¹). Si la composición atmosférica cambia, se modifica el efecto invernadero y, en consecuencia, la temperatura media superficial del planeta. Anteriormente a la Revolución Industrial, la concentración media global del dióxido de carbono era del orden de 280 ppm mientras que en la actualidad es, como se ha dicho, de unas 380 ppm. En estas condiciones, el efecto invernadero natural que se da en el planeta está siendo modificado desde la Revolución Industrial. Como la concentración de CO_2 ha aumentado (pero también la de otros gases favorecedores del efecto invernadero, como metano, óxido nitroso, CFCs,

etc.) el efecto invernadero se ve intensificado, con lo cual existen las condiciones para que se produzca un calentamiento del clima a escala planetaria. En la figura 3.1 están representadas (paneles a, b y c, respectivamente) las variaciones de concentración de CO_2 , metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O). En la escala de la izquierda de esos paneles se da la concentración del correspondiente gas de efecto invernadero (GEI), mientras que en la escala de la derecha se representa el denominado forzamiento radiativo, equivalente de la intensificación del EI que implica el aumento de concentración del GEI expresado en unidades de radiación (Wm^{-2}). De esos tres paneles se deduce que el cambio experimentado por los GEI tras la Revolución Industrial no tiene precedente reciente: mientras que la concentración atmosférica de CO_2 aumentó sólo 20 ppm durante los 8.000 años previos a la industrialización, a partir de 1750 la concentración de CO_2 ha aumentado más de 100 ppm.

1. Partes por millón, medida de concentración para constituyentes poco abundantes. Equivale a una fracción molar de $\mu mol/mol$. De forma semejante, una fracción molar de $nmol/mol$ se representa por ppb (partes por "billion" —mil millones—) y $pmol/mol$ por ppt (partes por "trillion" —billón en castellano—). Si se toma en consideración el comportamiento no ideal de los gases, a veces se utilizan concentraciones en volumen (ppmv, ppbv, pptv), diferentes de las anteriores.

Aproximadamente las dos terceras partes de ese incremento se deben a la quema de combustibles fósiles y el tercio restante al cambio de usos de la tierra. En el panel d se representa el ritmo de cambio del forzamiento combinado de los mismos tres GEI, lo cual da como valor integrado $1,66 \text{ W m}^{-2}$ desde 1750.

- Presencia de aerosoles en la atmósfera. En la atmósfera se encuentran una gran cantidad de partículas materiales en suspensión. Su origen se halla principalmente en el suelo y en la superficie de los océanos, siendo las de origen marino de gran importancia meteorológica, pues sin ellas sería prácticamente imposible que se formaran las nubes, al ser necesario un núcleo sólido para que se produzca la nucleación que da lugar a las proto-gotas de nube. Las erupciones volcánicas y también las actividades humanas introducen partículas en el aire.

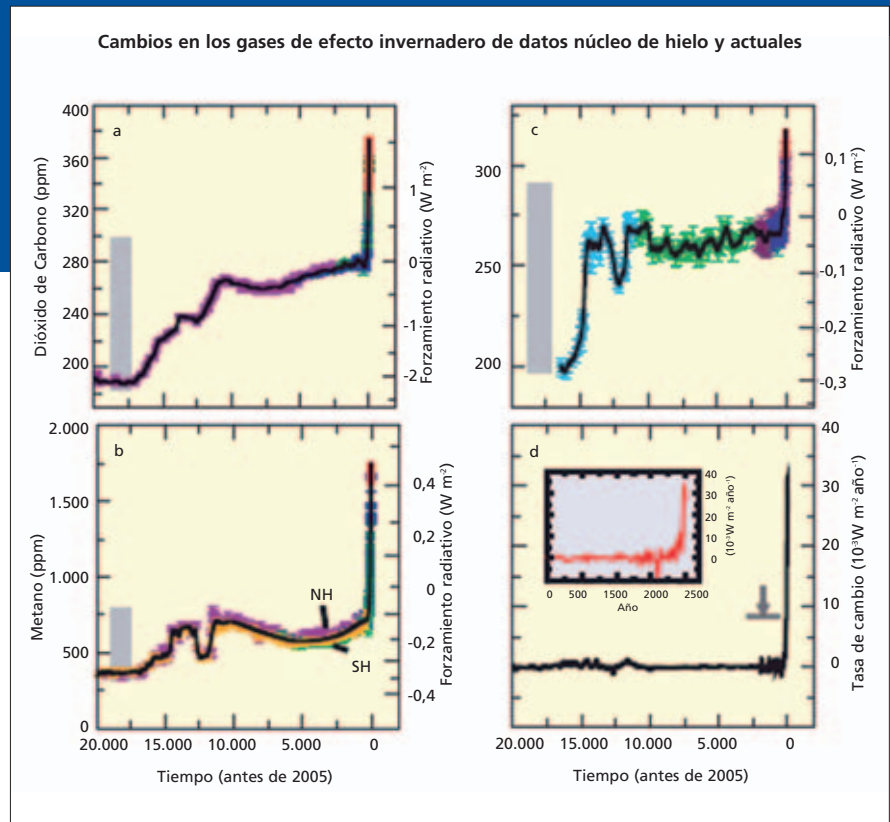


Figura 3.1 Concentraciones y forzamiento radiativo del (a) dióxido de carbono (CO_2), (b) metano (CH_4), (c) óxido nítrico (N_2O) y (d) la tasa de cambio de su forzamiento radiativo combinado durante los últimos 20.000 años reconstruida a partir del hielo antártico y de Groenlandia y de datos de nieve granular (símbolos) y mediciones atmosféricas directas (paneles a, b, c, líneas rojas). Las barras grises muestran los niveles de variabilidad natural reconstruidos durante los últimos 650.000 años. La tasa de cambio del forzamiento radiativo (panel d, línea negra) se calculó mediante una curva de ajuste *spline* de los datos de concentración. La resolución temporal varía desde aproximadamente 20 años para lugares con gran acumulación de nieve como Law Dome, Antártida, hasta aproximadamente 200 años para lugares con poca acumulación como Dome C, Antártida. La flecha muestra el pico en la tasa de cambio del forzamiento radiativo que resultaría si las señales antropogénicas de CO_2 , CH_4 , y N_2O se suavizaran de acuerdo con las condiciones de baja acumulación en el Dome C. La tasa de cambio negativa del forzamiento, aproximadamente en 1.600, en el panel de alta resolución insertado en d, es debido a una disminución del CO_2 de unas 10 ppm en el registro del Law Dome.

Fuente: IPCC, 2007.



Izquierda: euforbia en el sotobosque de un pinar de pino canario en la isla de la Palma. Derecha: pinos azotados por el viento en Tarifa (Parque Natural del Estrecho de Gibraltar)

Fotografías: F. Valladares.

El nombre genérico que se le da a esa masa en forma de partículas es el de aerosoles² (se excluye al agua en fase sólida y líquida que forma las nubes y a la precipitación).

Los aerosoles atmosféricos también participan en el efecto invernadero, aunque su comportamiento es más complejo que el de los gases, ya que tanto atenúan la radiación solar como absorben radiación terrestre.

- Papel de las nubes. Algo parecido a lo anterior ocurre con las nubes; pueden tender a favorecer o atenuar el efecto invernadero dependiendo de su tipo y altura. Así, las nubes altas (como, por ejemplo, los cirroestratos) dejan pasar la radiación solar pero absorben la terrestre, mientras que las nubes medias (por ejemplo, los altocúmulos) impiden casi completamente el paso de la radiación solar.

2. Desde el punto de vista de una disolución, la atmósfera en su conjunto sería un aerosol, pero no es éste el uso que se da al término en las ciencias atmosféricas sino el que se ha indicado en el texto.

3.2. El ciclo del agua

El agua constituye el elemento principal de nuestro planeta, cubriendo sus dos terceras partes. El agua resulta esencial para la vida en la Tierra, y cambios menores en su volumen o composición pueden producir impactos importantes en los sistemas biológicos, y en particular en los sistemas antrópicos. La historia de la humanidad ha estado siempre marcada por la disponibilidad de agua, favoreciendo el florecimiento de civilizaciones en periodos de abundancia (e.g. Antiguo Egipto y las inundaciones del Nilo), o su colapso en periodos de ausencia prolongada (e.g. Mesopotamia), llegando incluso a provocar su desaparición (e.g., como, según algunos autores, fue el caso de la civilización maya).

El agua se encuentra en la superficie terrestre en un estado de equilibrio dinámico, circulando entre los océanos, la atmósfera y los ambientes continentales, en un sistema de intercambio conocido como ciclo hidrológico. Las vías de flujo en este

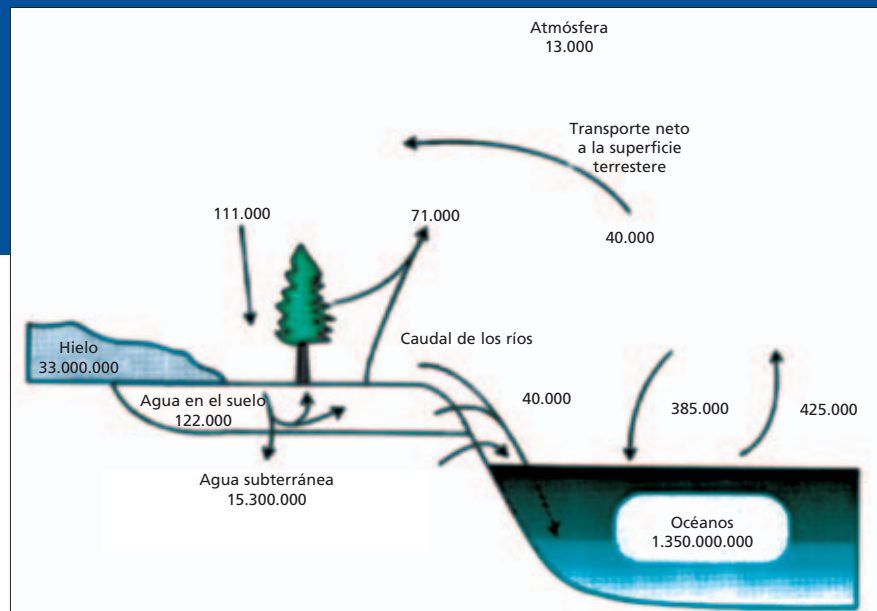


Figura 3.2. Ciclo global del agua. Los volúmenes almacenados están en km³, mientras que los flujos (indicados con flechas) están en km³/año.

Fuente: Schlesinger, 1997.

intercambio incluyen la precipitación, evaporación, evapotranspiración por la vegetación, recarga, descarga y escorrentía. El volumen total de agua en la Tierra es de 1.400 millones de kilómetros cúbicos (aprox. 400 veces el volumen del Mediterráneo), la mayor parte (97%) se encuentra almacenada en los océanos, y solamente el 2,8% corresponde a agua dulce (figura 3.2.). La mayor parte del agua dulce presenta una distribución geográfica irregular y frecuentemente se encuentra en estado sólido (hielo o nieves perpetuas) o en acuíferos profundos, dificultando su utilización. La

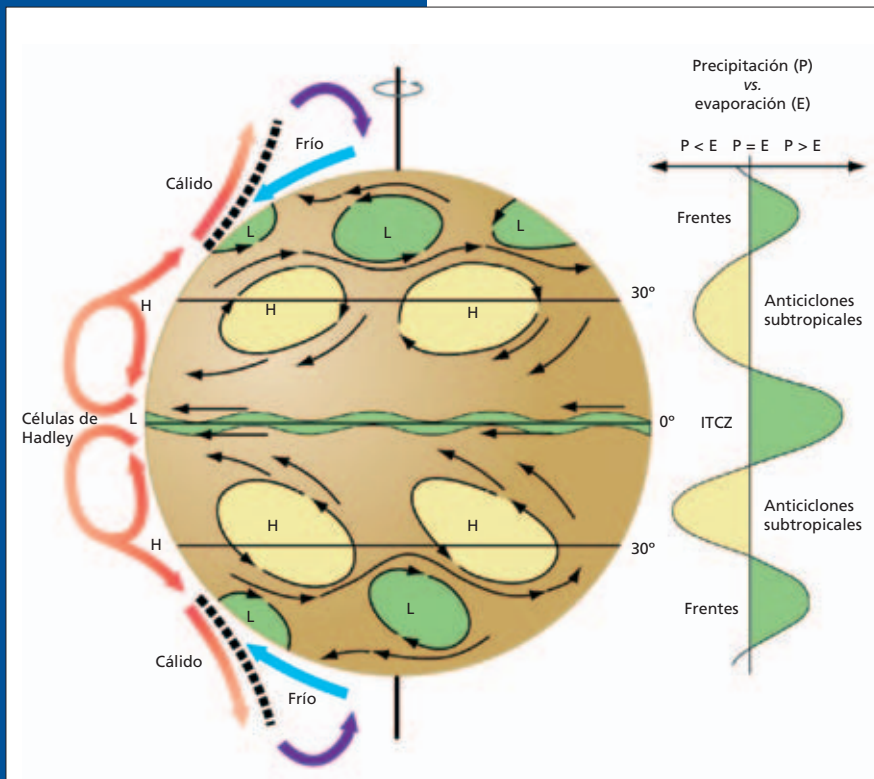


Figura 3.3. Esquema de los principales elementos de la circulación general de la atmósfera y distribución de la relación latitudinal de la precipitación versus evaporación. ITCZ: Zona de convergencia intertropical.

fuerza principal de agua para el consumo humano se encuentra en ríos, lagos, suelos y en acuíferos relativamente someros. Estas fuentes de agua accesible para el uso humano representan menos del 1% del conjunto del agua dulce terrestre (UNEP, 2002).

La distribución del agua dulce resulta regionalmente muy desigual. La evaporación en los océanos varía entre los 4 mm/día en los trópicos, a

<1mm/día en los polos. Esta diferencia favorece el movimiento de vapor de agua en la atmósfera y de calor latente hacia las regiones polares. En latitudes bajas y altas de los dos hemisferios (figura 3.3.) predomina la precipitación sobre la evaporación. Por el contrario, en latitudes intermedias predomina la evaporación, exportándose este exceso de agua hacia las latitudes bajas anteriormente indicadas. Este transporte se efectúa a través de la circulación atmosférica.

En la actualidad el 54% del agua dulce terrestre ya está siendo utilizada por la humanidad. En los últimos 70 años, el consumo de agua se ha incrementado seis veces, mientras que la población mundial se ha triplicado. De acuerdo con las Naciones Unidas, 1,2 billones de personas en el mundo todavía no tienen acceso a sistemas de agua potable, y entre 2,5 y 3,3 billones de personas (casi la mitad de la población mundial) carecen de infraestructuras básicas de saneamiento. La mayor parte de los recursos hídricos (70%) se utilizan en la agricultura, donde se mantienen sistemas de riego ineficientes con pérdidas de evaporación de hasta el 60%. Por su parte, la industria utiliza el 22% de los recursos de agua globales y, escasamente, el 8% se destina a usos domésticos y de servicios.

En España, la situación es similar con el 80% de los recursos utilizados en la agricultura (24.200 Hm³), frente al 14% de abastecimiento a núcleos urbanos (4.300 Hm³/año), y el 6% destinado a la industria (1.900 Hm³/año).

En la Tierra, además del ser humano, existe una gran comunidad de usuarios que comprende al resto de los seres vivos que, como nosotros, requieren de un mínimo de cantidad y calidad de agua para sobrevivir. Igualmente, el agua es imprescindible para el funcionamiento de la geodinámica externa y la atmósfera del sistema terrestre. El conjunto de los elementos bio-geo-físicos presentes en la Tierra son vitales en la subsistencia y desarrollo del ser humano, dado que le proveen de recursos naturales (comida, combustible, medicinas, etc.) y de servicios (seguridad medioambiental, sumideros de carbono, etc.). Los usos y abusos que el ser humano realiza de los recursos hídricos incluyendo la contaminación del agua, y el desarrollo urbanístico e industrial desmesurado, incrementan el estrés hídrico de muchas regiones y amenaza la subsistencia de muchos seres vivos. Este estrés actual sobre los recursos hídricos se agrava por el cambio global (climático y ambiental), produciéndose una alteración del

ciclo hidrológico cuyos resultados son difíciles de prever con precisión en la actualidad.

3.3. Los ciclos de los elementos

Los principales elementos que constituyen los tejidos vivos de los organismos y que explican el 95% de la biosfera, son carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre (C, H, O, N, P y S). Para mostrar los ciclos elegimos C, N y S que van a presentar importantes perturbaciones por la actividad antropogénica. Estos elementos también se encuentran en la naturaleza no viva acumulados en depósitos.

Ciclo del carbono

El ciclo del carbono es de gran interés en biogeoquímica porque la mayor parte de los tejidos están compuestos de carbono. Además el papel como gas invernadero del CO₂ ha incrementado el interés y el esfuerzo científico en comprender y cuantificar los intercambios de carbono asociados al ciclo de este elemento. El elemento carbono es básico en la formación de moléculas orgánicas de carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos. Los organismos fotosintéticos, usando la luz solar como energía captan CO₂ y producen materia orgánica y oxígeno. Así pues CO₂ y O₂ están íntimamente relacionados. El proceso

contrario es la mineralización de la materia orgánica, que tiene lugar como resultado de la respiración de los organismos para extraer la energía contenida en las moléculas orgánicas o procesos fotoquímicos capaces de remineralizar la materia orgánica, con el consiguiente consumo de oxígeno y aumento de CO₂ así como de los otros elementos que forman la materia orgánica (N, P, S), incorporándose nuevamente al ciclo en forma inorgánica. La materia formada durante el proceso fotosintético puede ser de consistencia blanda o dura, como en el caso de algunos organismos acuáticos que poseen caparazones calcáreos. Así, cuando los organismos mueren sus caparazones se depositan en el fondo formando sedimentos calizos en los que el carbono queda retirado del ciclo durante miles y millones de años. Este carbono se incorpora lentamente al ciclo cuando se van disolviendo los carbonatos cálcicos. El carbono se encuentra en diferentes formas, como dióxido de carbono tanto en gas como disuelto el agua, ácido carbónico, carbonato y bicarbonato.

El ciclo global del carbono consta de tres reservas principales de carbono: la atmosférica, la oceánica y la terrestre. En la figura 3.4. se pueden observar, en negro, tanto las reservas naturales como los flujos a través de las distintas reservas. Los océanos son grandes depósitos de CO₂ (38.000 Pg)

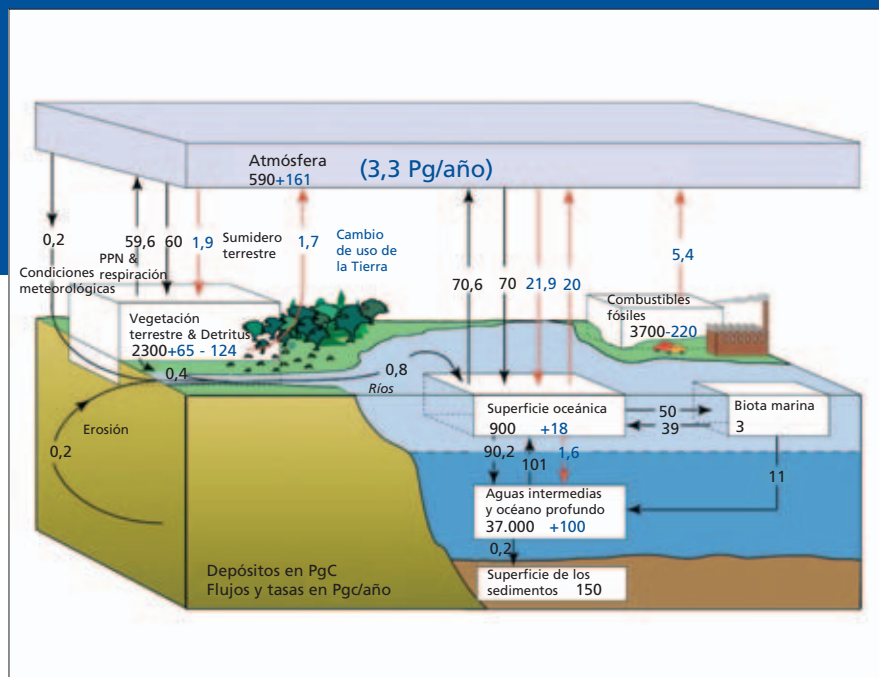


Figura 3.4. Los flujos (representados por flechas) están en Pg (10^{15} g) C año⁻¹ y los reservorios (representados por cajas) en Pg C. Las flechas y cifras en negro representan el ciclo natural y las flechas y cifras en rojo representan la alteración de los flujos y reservorios por la actividad humana. Fuente: Sarmiento y Gruber, 2002.

conteniendo unas 50 veces más que la atmósfera (590 Pg) y unas 20 veces más que los continentes (2.300 Pg). La captación de CO₂ por parte de los océanos se ve favorecida por la solubilidad de CO₂ y su capacidad tampón. El intercambio de carbono entre los distintos depósitos (atmósfera, océano y tierra) nos indica si éstos se están comportando como sumideros o fuentes. En el ciclo natural los flujos son muy pequeños. El océano emite

0,4 Pg C año⁻¹ mientras que esa misma cantidad es captada por producción de la vegetación terrestre. La contribución de C inorgánico y orgánico de los ríos al océano es de 0,8 Pg C año⁻¹.

Ciclo del nitrógeno

El nitrógeno es un elemento esencial para los seres vivos ya que es un componente fundamental del ADN, ARN y las proteínas. Es un elemento

muy versátil que existe en forma orgánica e inorgánica. Permite un gran número de transformaciones bioquímicas ya que el nitrógeno se encuentra en la naturaleza en gran número de estados de oxidación: amonio (-3), nitrógeno molecular (+0), óxido de nitrógeno (+1), nitrito (-3) y nitrato (+5). La forma más abundante en la atmósfera es el nitrógeno molecular (N₂) que es la especie menos reactiva.

Al igual que el ciclo del carbono, el del nitrógeno consiste en varios depósitos y procesos mediante los cuales se intercambia nitrógeno. Los procesos principales que componen este ciclo son: la fijación e incorporación de nitrógeno, mineralización, nitrificación y desnitrificación. En la fijación el N₂ se convierte en amonio. Este proceso es esencial porque representa el único mecanismo por el cual los organismos pueden obtener el nitrógeno directamente de la atmósfera. Existen algunas bacterias terrestres, como *Rhizobium* o marinas como

Trichodesmium, que son capaces de fijar nitrógeno molecular. El descubrimiento de la reacción de Haber, patentada en 1908 por Fritz Haber, que permite fijar nitrógeno gas atmosférico en amonio para su uso en fertilizantes supone una nueva componente tecnológica, en vez de biológica, de la fijación de nitrógeno que fija actualmente aproximadamente 154 Tg (10^{12} g) de nitrógeno atmosférico, más que los procesos de fijación de nitrógeno que ocurren a través de la actividad nitrogenasa presente en plantas y microorganismos terrestres y marinos. Después de que el nitrógeno se incorpora a la materia orgánica, éste se vuelve a convertir en nitrógeno inorgánico mediante el proceso de mineralización desarrollado por bacterias. Una vez que el nitrógeno está en forma de amonio está de nuevo disponible para ser usado por los productores primarios o para ser transformado a nitrato a través del proceso de nitrificación que requiere la presencia de oxígeno. En la desnitrificación las formas oxidadas de nitrógeno como nitrato y nitrito se convierten en N_2 y óxido nitroso gas (N_2O).

La atmósfera contiene la mayor parte de nitrógeno ($3.9 \cdot 10^{21}$ g N). Cantidades relativamente pequeñas de nitrógeno se encuentran en la biomasa terrestre ($3.5 \cdot 10^{15}$ g N) y en la materia orgánica del suelo ($95-140 \cdot 10^{15}$ g N). Los océanos reciben el aporte de $36 \cdot 10^{12}$ g N

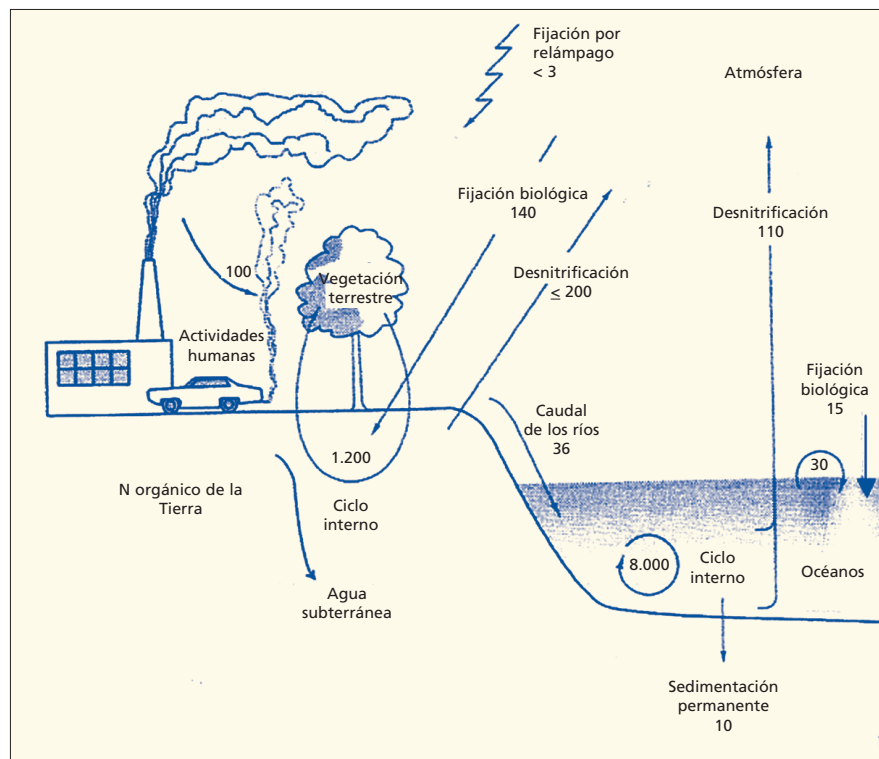


Figura 3.5. El ciclo global del nitrógeno, mostrando la conexión entre atmósfera, tierra y océano. Los flujos (representados por flechas) están en Tg (10^{12} g) N año $^{-1}$ y los reservorios (representados por cajas) en Tg N .

Fuente: Schlesinger, 1997.

año $^{-1}$ en formas disueltas por los ríos (Meybeck, 1982), alrededor de $15 \cdot 10^{12}$ g N vía fijación de nitrógeno y cerca de $30 \cdot 10^{12}$ g N por precipitación (Duce *et al.* 1991). Aunque el flujo de los ríos es un componente bastante pequeño del ciclo terrestre, contribuye en un 40% del nitrógeno total vertido anualmente al mar. Estos vertidos de nitrógeno

tienen gran importancia en las zonas costeras y en estuarios. El océano contiene una gran reserva de nitrógeno de aproximadamente $570 \cdot 10^{15}$ g N obtenidos por la descomposición de la materia orgánica. El nitrógeno orgánico sedimentado es muy pequeño ($10 \cdot 10^{12}$ g N año $^{-1}$), así pues, la mayor parte de la contribución de nitrógeno al océano es

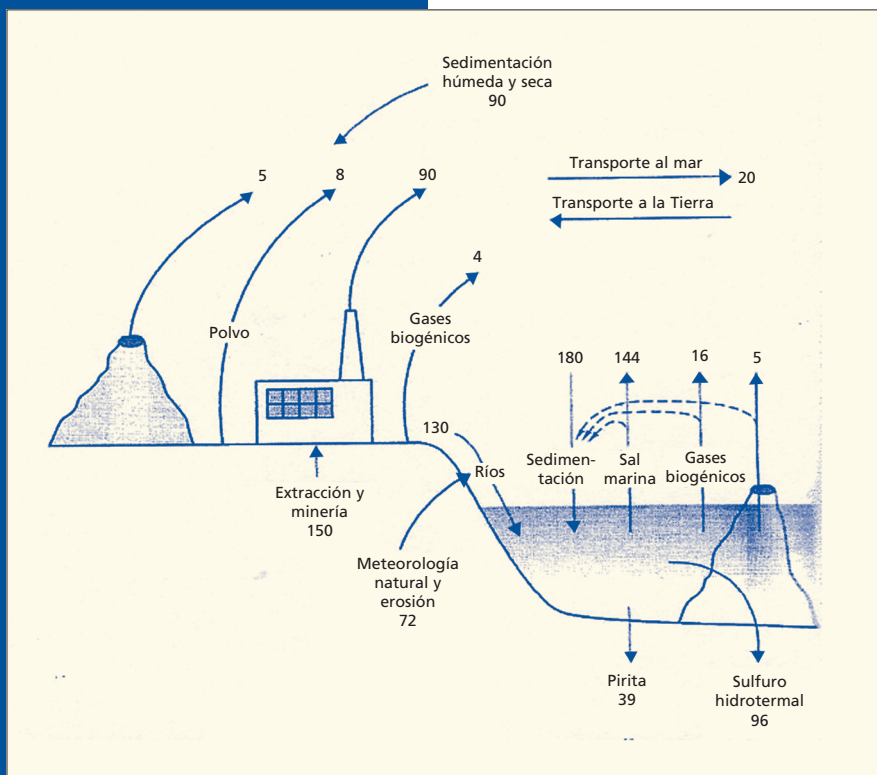


Figura 3.6. El ciclo global del azufre, mostrando la conexión entre atmósfera, tierra y océano. Los flujos (representados por flechas) están en Tg (10^{12} g S año⁻¹) y los reservorios (representados por cajas) en Tg S.

Fuente: Schlesinger, 1997.

devuelto a la atmósfera como N_2 por el proceso de desnitrificación ($110 \cdot 10^{12}$ g N año⁻¹).

Ciclo del azufre

El azufre es otro de los elementos esenciales para la vida, pues forma parte de las proteínas. En el medio abiótico (océanos y litosfera), el azufre se encuentra principalmente como sulfato, es decir en su forma oxidada. La

movilización de ese sulfato por parte de los seres vivos la realizan los microorganismos mediante reducción asimilativa (el sulfato es convertido en aminoácidos y proteínas) y disimilativa (el sulfato es convertido a sulfuro y liberado al medio). Los organismos que no tienen capacidad para transformar el sulfato toman el azufre ya reducido de su dieta. Como muestra la figura 3.6., la vegetación terrestre ($4 \cdot 10^{12}$ g S año⁻¹) y el plancton marino ($16\text{-}30 \cdot 10^{12}$ g S año⁻¹) liberan parte de su azufre reducido en forma de gases a la atmósfera, donde, juntamente con los gases emitidos por los volcanes ($5\text{-}7 \cdot 10^{12}$ g S año⁻¹), sufre procesos de oxidación que lo convierten mayoritariamente de nuevo a sulfato. Otras fuentes importantes de sulfato atmosférico son la suspensión de partículas de sal ($144 \cdot 10^{12}$ g S año⁻¹) y de polvo ($8 \cdot 10^{12}$ g S año⁻¹) por acción del viento sobre la superficie de los océanos y los suelos áridos. En conjunto, el azufre tiene un tiempo de residencia media en la atmósfera muy corto, de unos 2 a 4 días. Puesto que el sulfato es muy soluble, en su mayoría se deposita con la lluvia cerca de los puntos de emisión, y el resto es transportado a largas distancias.

En las regiones oceánicas alejadas de los continentes, las fuentes mayoritarias de azufre atmosférico son la sal marina, que en su mayoría se vuelve a depositar rápidamente en el océano, y el gas de

origen biológico dimetilsulfuro (DMS). En un tiempo de alrededor de un día, el DMS atmosférico se oxida a sulfato y sulfonato y forma pequeñas partículas donde condensa el agua. La formación de nubes depende no solamente de la humedad del aire, sino también de la existencia de partículas de condensación. Si dichas partículas son muy abundantes, la nube se forma con un número mayor de gotas pequeñas, lo que la lleva a tener una vida más larga y a reflejar mejor la luz solar (es decir, a tener un mayor albedo). Si hay pocas partículas de condensación, la nube crece con menos gotas y de un tamaño mayor, es más transparente a la radiación solar y se deshace antes en forma de lluvia. En el océano remoto, las partículas de condensación son escasas y dependen en gran medida de las emisiones de DMS. Es decir, el plancton marino, mediante la producción de DMS, interviene en la formación y brillo de las nubes y, por lo tanto, en el clima.

3.4. El papel de los organismos

De lo anteriormente expuesto se deduce que la vida es parte central del funcionamiento de la biosfera, alterando la composición gaseosa de la atmósfera, con lo que afecta al clima, y participando en el reciclado de materiales necesario para mantener los

ciclos del agua y de los elementos. El grado de control de la vida sobre el funcionamiento de la biosfera es tal que en los años 60 el investigador británico James Lovelock acuñó la hipótesis de Gaia, prácticamente panteísta, que concebía la interacción compleja entre los componentes del planeta Tierra (biosfera, atmósfera, océanos y suelos) como un sistema que se autorregula para mantener condiciones óptimas para la vida (Lovelock, 1995). Aunque esta hipótesis fue severamente criticada en sus primeras formulaciones, es indudable su influencia en el origen de la disciplina emergente conocida como Ciencia del Sistema Tierra, que investiga la regulación de los procesos esenciales del planeta a partir de las interacciones entre sus distintos componentes.

A pesar de la diversidad de formas de vida que pueblan la Tierra, los organismos que participan de forma más intensa en la regulación del funcionamiento de la biosfera son los microorganismos. Éstos, cuyos componentes son relativamente homogéneos morfológicamente pero reúnen la mayor parte de la diversidad genómica del planeta, son responsables de la mayor parte del reciclado de materiales, remineralizando la materia orgánica a formas inorgánicas que pueden ser utilizadas de nuevo en procesos productivos, y son responsables de la mayor parte de la producción primaria en el océano.

Los organismos determinan la composición gaseosa de la atmósfera a través del equilibrio entre sus procesos metabólicos, particularmente la fotosíntesis (que consume CO_2 y libera O_2) y la respiración (que consume O_2 y libera CO_2). Las variaciones en este equilibrio son causantes de las grandes variaciones en la composición de la atmósfera durante la historia del planeta, así como de las oscilaciones estacionales en la composición gaseosa de la atmósfera. De hecho, las emisiones de CO_2 por la actividad humana se podrían equiparar a un proceso respiratorio exógeno. Al igual que los procesos respiratorios, se basa en materia orgánica formada por procesos fotosintéticos, en este caso depósitos de combustibles fósiles generados por excedentes de producción primaria en eras pasadas, y tiene como función esencial generar energía, en este caso no para mantener los procesos metabólicos esenciales, sino para el transporte y la manipulación del ambiente. La actividad biológica natural también afecta al ciclo hidrológico: las cubiertas vegetales afectan la escorrentía y los flujos de agua a la atmósfera a través de la evapotranspiración, y algunos organismos, como las plantas acuáticas y las presas construidas por los castores, pueden afectar al flujo de agua en ríos y arroyos. La presencia de cubierta vegetal reduce también la erosión del suelo y ayuda a prevenir

la desertificación. Los organismos aceleran la meteorización y transformación de rocas y minerales a través de las variaciones de pH que provocan y las sustancias que liberan. Generan también minerales, como carbonatos y silicatos, interviniendo de forma decisiva en los ciclos geológicos del planeta. Afectan también al clima, a través de su efecto sobre la composición

de gases de efecto invernadero, como el CO₂, el metano o el óxido nitroso, o de efecto refrigerante, como el DMS y otros precursores de aerosoles y nubes. Los organismos también afectan al balance térmico de la Tierra, pues las superficies cubiertas por vegetación tienen un menor albedo, es decir, una menor reflexión de la radiación solar incidente. Además, la absorción de luz

por los organismos fotosintéticos del océano genera calor, lo que puede llegar a afectar al grado de mezcla de las aguas superficiales. Está claro, pues, que los impactos de la actividad humana sobre los ecosistemas (por ejemplo, modificando la cubierta vegetal o eutrofizando el océano) pueden tener importantes repercusiones sobre los ciclos de los elementos y el clima.

Referencias

- DUCE, R. A.; LISS, P. S.; MERRILL, J. T.; ATLAS, E. L.; BUAT-MENARD, P.; HICKS, B. B.; MILLER, J. M.; PROSPERO, J. M.; ARIMOTO, R.; CHURCH, T. M.; ELLIS, W.; GALLOWAY, J. N.; HANSEN, L.; JICKELLS, T. D.; KNAP, A. H.; REINHARDT, K. H.; SCHNEIDER, B.; SOUDINE, A.; TOKOS, J. J.; TSUNOGAI, S.; WOLLAST, R.; ZHOU y M. (1991). "The atmospheric input of trace species to the world ocean". *Global Biogeochemical Cycles*, 5: 193-259.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 3 vols.
- LOVELOCK, J. (1995). *The Ages of Gaia: A Biography of Our Living Earth*.
- McGUFFIE, K. y HENDERSON-SELLERS, A. (2005). *A climate modelling primer*. Wiley. 280 pp.
- MEYBECK, M. (1982). "Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers". *American Journal of Science*, 287: 301-428.
- MMA, 2005: *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*. J.M. Moreno, ed., Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Castilla-La Mancha. 822 pp.
- NERC (2005). "Climate Change. Scientific certainties and uncertainties". *Natural Environment Research Council*, UK. 6 pp.
- RIVERA, A. (2000). *El cambio climático: el calentamiento de la Tierra*. Temas de Debate, Madrid. 270 pp.
- SARMIENTO, J. L.; GRUBER N. (2002). *Sinks for anthropogenic carbon*. *Physics Today*. American Institute of Physics S-0031-9228-0208-010-9.
- SCHLESINGER, W. H. (1997). *Biogeochemistry: An analysis of global change*. Academic Press., San Diego, 588 pp.
- UNEP (2002). *Global Environment Outlook - 3*. Earthscan.

4. La maquinaria de la biosfera en el Antropoceno

Como se ha comentado anteriormente, el cambio global es más que un cambio climático: a lo largo de los últimos siglos, las actividades humanas han conllevado efectos importantes y diversos para los sistemas naturales. Por sistemas naturales cabe entender no solamente los ecosistemas confinados geográficamente, que en muchos casos han visto modificados su extensión y dinámica de funcionamiento, sino también los grandes compartimentos ambientales (atmósfera, océanos, aguas continentales, suelos, masas forestales), cuyos flujos de energía y materia determinan el funcionamiento del planeta. Los cambios recientes en los ciclos de los elementos, por ejemplo, son tan profundos que podríamos hablar de una nueva era geológica en la historia de nuestro planeta, el Antropoceno (ver sección 3) que habría

empezado a finales del siglo XVIII con el invento de la máquina de vapor, el inicio de la industrialización con combustibles fósiles, la explosión demográfica y el inicio del aumento de las concentraciones de CO₂ y metano en la atmósfera. En este capítulo se presenta el impacto de la actividad humana sobre los motores de la biosfera en el Antropoceno.

4.1. Perturbaciones en el ciclo del agua

En la historia de la Tierra se observa que las perturbaciones en el clima han generado cambios importantes en el ciclo hidrológico. A modo de ejemplo, durante el último periodo glacial (hace 18.000 años), un 3% del volumen oceánico (42 millones de km³)

quedaron atrapados en los casquetes glaciares, produciendo un descenso del nivel del mar de 120 m con respecto al nivel actual. Igualmente, este periodo se caracterizó por un descenso en la tasa de evaporación y precipitación, la reducción de la circulación de la humedad a través de la atmósfera, la disminución de la biomasa terrestre, la expansión de los desiertos y el aumento del transporte eólico, entre otros.

Las interacciones entre clima e hidrología son tan estrechas que cualquier cambio afecta en una doble dirección. Por un lado, los cambios en las variables climáticas (e.g. temperatura y precipitación) producen impactos significativos en los recursos hídricos, y a partir de éstos en las sociedades y los ecosistemas. Por otro, los cambios inducidos por el ser humano en los recursos hídricos (e.g. embalses, sistemas de irrigación, sobreexplotación de acuíferos) influyen en las condiciones climáticas. Tanto el clima como el ciclo del agua son complejos, sujetos a relaciones causa-efecto y acción-reacción no proporcionales y, por tanto, resulta extremadamente complejo determinar los impactos directos que se derivan de perturbaciones en la hidrosfera.

El *Tercer Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental del Cambio Climático* (IPCC, 2001) señala las evidencias de los cambios en las variables críticas que han controlado el

ciclo hidrológico y el clima durante el siglo XX. Entre los hechos más relevantes para el ciclo hidrológico tenemos: (1) aumento de $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ en la temperatura media global, (2) aumento de 7-12% en la precipitación continental sobre la mayor parte del Hemisferio Norte, (3) fuerte retroceso de la mayor parte de los glaciares de montaña y de los polos, (4) retraso en las primeras heladas de otoño, (5) adelanto del deshielo en muchos de los lagos del Hemisferio Norte, y (6) ascenso del nivel de mar. Aunque más inciertos, algunos cambios potencialmente importantes incluyen un aumento del 2% en la cobertura de nubes sobre muchas zonas de latitudes medias y altas (albedo y aumento del efecto invernadero), aumento del 20% en la cantidad de vapor de agua en la estratosfera baja (aumento del efecto invernadero), cambios en el almacenamiento y transporte de calor en el océano, interacciones entre el ciclo del agua y del carbono, e incremento global en eventos extremos (sequías y riadas).

Los cambios del ciclo hidrológico incidirán en una doble vertiente: (1) en los recursos hídricos disponibles, alterando la distribución del agua tanto en su actual distribución regional, como el volumen presente en los distintos componentes del ciclo hidrológico, y (2) en la magnitud y frecuencia de los extremos hidrológicos, cuyos impactos

pueden ser magnificados por la vulnerabilidad de los sistemas.

La mayor parte de modelos climáticos predicen un planeta más húmedo en relación con el calentamiento global, asociado a un incremento en la tasa del movimiento del agua en el ciclo hidrológico, con un aumento en la evaporación, precipitación y escorrentía. Sin embargo, no todas las áreas estarán afectadas con estas tendencias, sino que en las latitudes medias y subtropicales se producirán cambios en sentido contrario con tendencia a una disminución de los recursos hídricos, y al aumento en la variabilidad hidrológica (aumento de las sequías y crecidas).

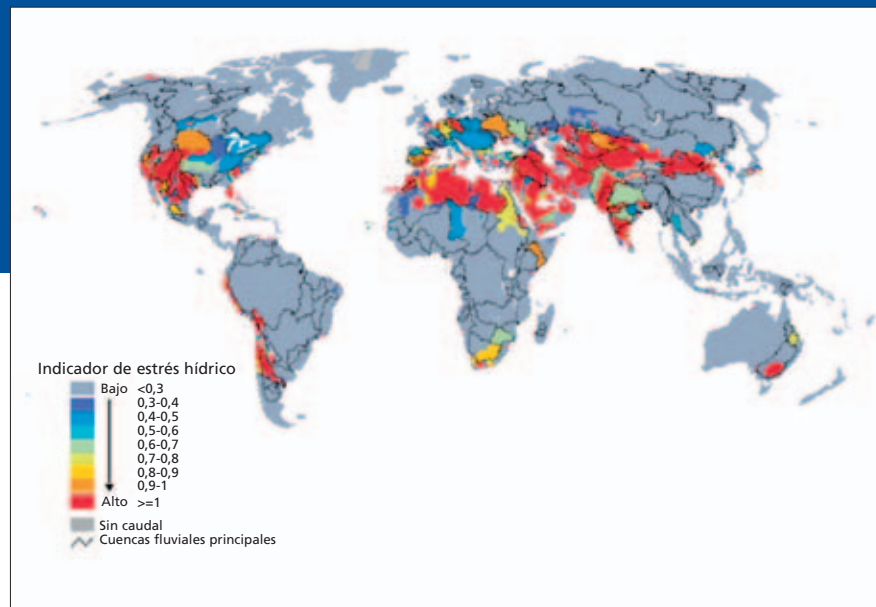
El efecto del cambio climático en los caudales de los ríos y de la recarga de los acuíferos depende de las regiones y los escenarios planteados, ajustándose en gran parte a los cambios que se esperan en la precipitación (figura 4.1.). Sin embargo, esta respuesta hidrológica de las cuencas no sólo depende de los cambios de variables climáticas (precipitación y temperatura), sino también de factores ambientales (usos de suelo, vegetación), y antrópicos (embalses, trasvases), lo que dificulta una estimación más precisa de la evolución de la escorrentía y su distribución. Los factores ambientales como los cambios de uso del suelo y en la vegetación dependen principalmente de factores económicos y sociológicos

Figura 4.1. Mapa mundial de indicadores de estrés hídrico.

Fuente: © 2003 World Resources Institute.

(demografía, economía, cultura, entre otros) y de limitaciones climáticas. La utilización de combustibles fósiles y reducción de la actividad agrícola ha favorecido la recuperación de la vegetación en numerosas regiones del planeta, reduciendo la escorrentía neta. Igualmente, la alteración de la hidrología superficial y subsuperficial se ha incrementado con la construcción masiva de presas y de trasvases para proyectos de irrigación, conduciendo a la fragmentación de los sistemas fluviales y la alteración de los regímenes de flujo. Estas alteraciones han afectado considerablemente a la biodiversidad y a los ecosistemas acuáticos.

Como consecuencia del aumento del uso de agua para la agricultura, grandes lagos, como el Mar de Aral, en Asia Central, han perdido gran parte de su extensión y volumen de agua, reduciéndose éste en 0,6 m cada año y la superficie ocupada por el Lago Chad, en África, se redujo en veinte veces en tan sólo quince años. El uso del agua por la humanidad y la transformación



del territorio han resultado en importantes cambios en el ciclo del agua. Aproximadamente el 60% de las zonas húmedas europeas existentes en 1800 se han perdido. El número de embalses construidos ha crecido rápidamente durante el siglo XX, a un ritmo de un 1% anual, reteniendo un volumen de agua de aproximadamente 10.000 km³, equivalente a cinco veces el volumen de agua contenidos en los ríos. El mayor de los embalses es actualmente el lago Volta (8.482 km²; Ghana), y siguen construyéndose grandes embalses como el embalse de las Tres Gargantas, sobre el río Yangtze en China, operativo desde octubre de 2008 con un volumen

máximo de embalse de 39,3 km³. El número de estanques para uso agrícola también ha aumentado, hasta alcanzar aproximadamente medio millón. Las extracciones de acuíferos también han aumentado notablemente, de forma que las extracciones aumentan mucho más rápido que las recargas. Solamente en China, existen más de dos millones de pozos, y en la India éstos alcanzan profundidades cada vez mayores, superando los mil metros de profundidad, al descender progresivamente el nivel de los acuíferos.

El cambio climático podría reducir aún más la disponibilidad de agua y la

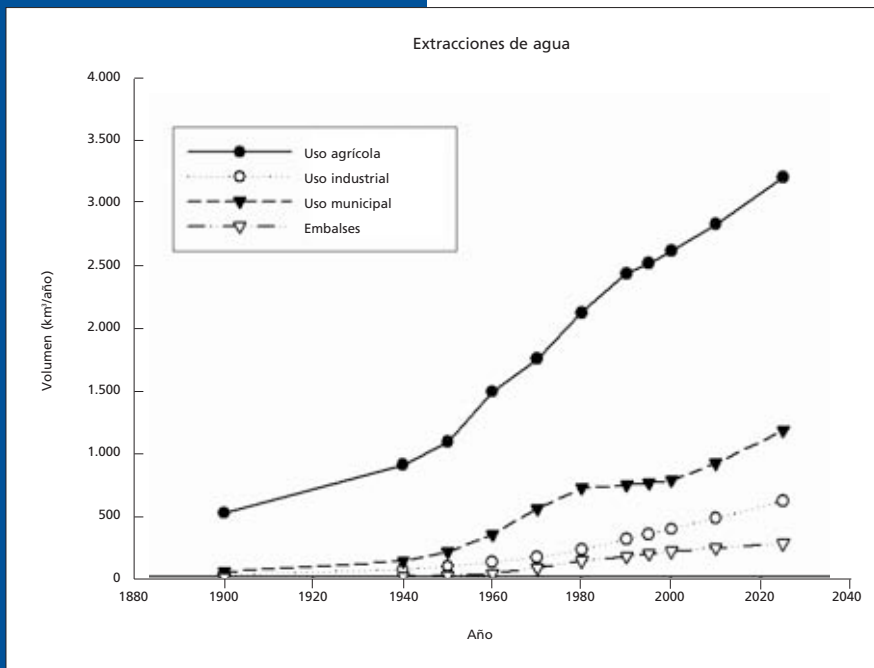


Figura 4.2. Valores de extracción de agua en el mundo para distintos usos humanos, y su proyección para el futuro.

Fuente: Shiklomanov, 1999, IHP UNESCO.

recarga de las aguas subterráneas en muchos de los países que presentan actualmente estrés hídrico, así como aumentarla en otras (IPCC, 2001). A esto hay que añadir que en los próximos cincuenta años la población mundial crecerá hasta alcanzar los 9.000 millones, produciendo una mayor presión sobre los recursos hídricos (Cosgrove y Rijsberman, 2000). Teniendo en cuenta tasas de consumo similares a las actuales, se espera que para el 2025 el uso de agua global aumente entre el 25 y el 50%, lo que supone que el 70% del suministro

de agua anual se emplee en cubrir las necesidades de 8.000 millones de personas (figura 4.2.). Sin embargo, si los consumos se incrementan hasta los niveles de los países más desarrollados, sería necesario utilizar hasta el 90% de los recursos disponibles. Igualmente, se prevé que dos tercios de la población mundial estarán sujetos a problemas de escasez de recursos hídricos, con menos de 50 litros diarios por persona.

En España, la sensibilidad de los recursos hídricos al aumento de temperatura y disminución de la precipitación es muy alta, precisamente en aquellas zonas con temperatura media alta y precipitaciones bajas. En las zonas semiáridas de nuestro país la reducción de la aportaciones pueden alcanzar el 50% (Iglesias *et al*, 2005). En el informe de la ECCE (Iglesias *et al*, 2005) se señala que para el horizonte 2030, considerando dos escenarios, uno con un aumento de 1°C en la temperatura media anual (escenario 1) y otro con disminución de un 5% en la precipitación media anual y aumento de 1°C en la temperatura (escenario 2), son esperables disminuciones medias de aportaciones hídricas en España, en régimen natural, entre el 5 y 14% (figura 4.3.). Para el horizonte 2060, con un escenario de 2,5°C de aumento de temperatura y un 8% de disminución de las precipitaciones se prevé una reducción global de los recursos hídricos del 17%, y un

aumento de la variación interanual de los recursos. Según este informe ECCE, las cuencas más afectadas corresponden al Guadiana, Canarias, Segura, Júcar, Guadalquivir, Sur y Baleares (figura 4.4.). En un trabajo previo, Ayala e Iglesias (1996) predicen una reducción media del caudal en España de 17% (equivalente a 20.115 hm³), oscilando entre el 34% para la cuenca del Guadalquivir y el 6% para las cuencas internas catalanas. Igualmente, la extracción de agua subterránea seguirá aumentando en aquellas zonas con mayor estrés hidrológico, que incluyen la zona costera mediterránea y meseta sur.

El aumento de la extracción de agua superficial y subterránea para consumo humano determinará en el futuro la reducción de los recursos disponibles en ríos, lagos y humedales. Se estima que el mantenimiento de los ecosistemas acuáticos requieren entre el 20 y el 50% del caudal medio anual de los principales ríos del mundo (Smakhtin *et al.*, 2004). Igualmente, se requieren enormes cantidades de agua para

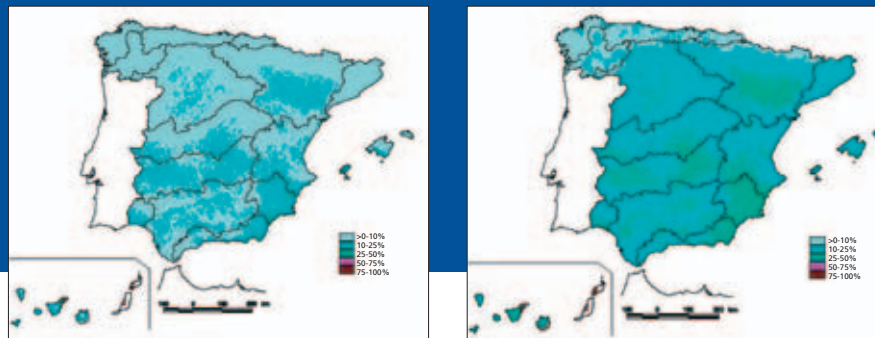


Figura 4.3. Mapa de disminución porcentual de la escorrentía para el escenario 1 y el escenario 2.
Fuente: Iglesias *et al.*, 2005 en informe ECCE.

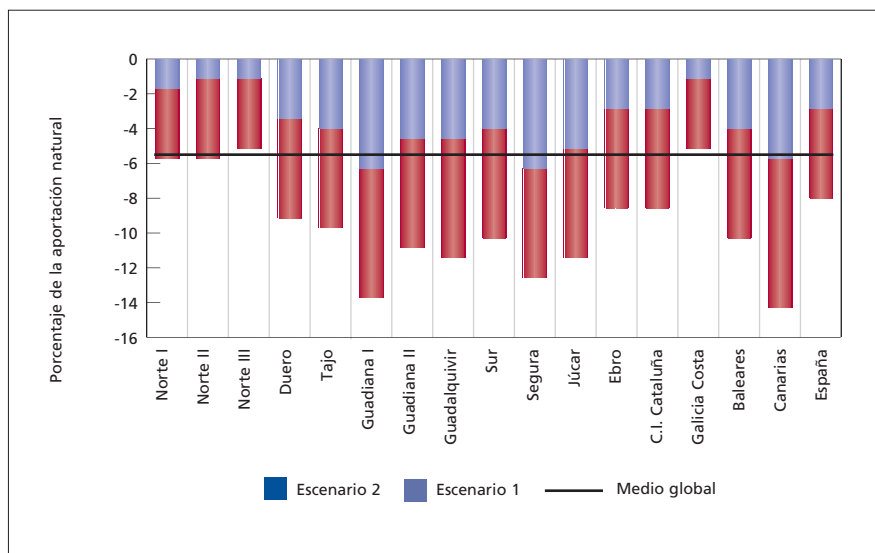


Figura 4.4. Porcentajes de disminución de la aportación total, para los escenarios climáticos considerados, en el largo plazo de la planificación hidrológica 2.
Fuente: Iglesias *et al.*, 2005 en informe ECCE.

mantener bosques, matorrales y pastizales.

Entre las perturbaciones del cambio global tenemos los cambios en los

patrones de magnitud y frecuencia de los eventos extremos como sequías e inundaciones. Se espera que el cambio climático cause una mayor frecuencia

y severidad de crecidas y sequías, que afecten la cadena de producción de alimentos, infraestructuras y especialmente un incremento de la vulnerabilidad social y de los ecosistemas (IPCC, 2001). De hecho, entre 1960 y la actualidad, más del 75% de los desastres naturales en el mundo y en España tienen origen climático, tales como crecidas, sequías y precipitaciones intensas. En España, el informe ECCE (Benito *et al*, 2005) indica que desde el 1910 hasta la actualidad, los ríos atlánticos han experimentado una disminución en la frecuencia de las crecidas extraordinarias, aunque la magnitud de las crecidas más catastróficas se ha mantenido e incluso aumentado a pesar del efecto laminador de los embalses (tabla 4.1.). Igualmente, se pronostica una tendencia al aumento de la variabilidad hidrológica (sequías y crecidas). En los ríos Duero y Ebro, los caudales punta pueden aumentar debido a fenómenos de deshielo súbito como consecuencia de la variación brusca de la temperatura de invierno y primavera. Igualmente, se apunta a un aumento en la generación de crecidas relámpago en las cuencas mediterráneas y el interior de la Península Ibérica. Entre las principales opciones adaptativas a las crecidas se encuentran los estudios de prevención que mejoren la ordenación territorial, así como los sistemas de predicción en tiempo real.

Possible impacto del cambio climático	Guadalquivir Guadiana Tajo	Duero	Norte	Ebro	Cuencas Internas de Cataluña	Levante/Sur
Cambio en la circulación zonal (NAO positiva)	-Extremos (+intensos) +Ordinarias (-Intensas)	-Extremos (+intensos) +Ordinarias (-Intensas)				
Aumento de fenómenos de gota fría			+Irregularidad de extremos		+Irregularidad de extremos	+Irregularidad de extremos crecida/sequías
Generación de núcleos convectivos	+Crecidas relámpago	+Crecidas relámpago	+Crecidas relámpago	+Crecidas relámpago	+Crecidas relámpago	+Crecidas relámpago
Cambios bruscos en la temperatura		+Crecidas por deshielo		+Crecidas por deshielo	+Crecidas por deshielo	

Tabla 4.1. Análisis cualitativo de la respuesta de diferentes cuencas españolas a posibles impactos del cambio climático. Menos (-), más (+).

Fuente: Benito *et al*, 2005, en informe ECCE.

En previsión de estos escenarios futuros será necesario hacer un importante esfuerzo encaminado a mejorar la eficiencia en el uso del agua y del suministro hídrico, así como alcanzar un desarrollo sostenible que permita el acceso al agua y a sistemas de saneamiento. Resulta especialmente crítico mejorar la eficiencia de los sistemas de riego (e.g. uso de riego por goteo), lo que supondría duplicar la eficiencia del uso del agua en la agricultura y gestionar cuidadosamente aquellos usos, como actividades lúdicas o deportivas que generan una presión importante sobre un recurso, el agua, que cada vez será más escaso. Es importante también considerar estos escenarios de cambio de régimen hidrológico al plantear una estrategia hidrológica

española. En particular, una estrategia basada en trasvases requiere, como premisa de partida, el que las cuencas donantes se mantengan en el tiempo como excedentarias en recursos hídricos. Lamentablemente, los escenarios expuestos generan grades incertidumbres sobre la posibilidad de que cuencas que actualmente son excedentarias, aunque lo sean por márgenes estrechos, se mantengan como tales en el futuro. A medida que aumenta la demanda de agua en el mundo, existe una mayor preocupación con los conflictos que la propiedad del agua pueda generar entre regiones, e incluso entre naciones. No hay que olvidar que más de doscientos ríos en el mundo presentan un carácter transnacional, algunos de ellos localizados en regiones conflictivas como el Cercano

Oriente, donde el control del agua juega a un papel importante, aunque no explícito, en las inestabilidades políticas que afectan a la seguridad de esta región. Los conflictos asociados al control del agua se extenderán en el futuro.

4.2. Perturbaciones en los ciclos de elementos

Ciclo del carbono

El gas más importante del efecto invernadero después del vapor de agua es el CO_2 , cuyas emisiones en la atmósfera se han ido incrementando desde la época pre-industrial como consecuencia de la combustión de fósiles ($5.4 \text{ Pg C año}^{-1}$) y el diferente uso de la tierra ($1.7 \text{ Pg C año}^{-1}$), dando lugar a un importante incremento en la atmósfera (figura 4.5).

Aproximadamente el 50% de las emisiones permanecen en la atmósfera, el otro 50% se incorpora al océano y a la vegetación terrestre, desacoplando el equilibrio natural de intercambio entre éstos y la atmósfera. El océano, en particular, se comporta como un sumidero neto de CO_2 que “secuestra” alrededor de 2 Pg de carbono antropogénico al año. Es decir, el océano juega un papel importante como depósito de CO_2 , sin el cual el aumento de la concentración atmosférica de este gas sería significativamente mayor de la actual.

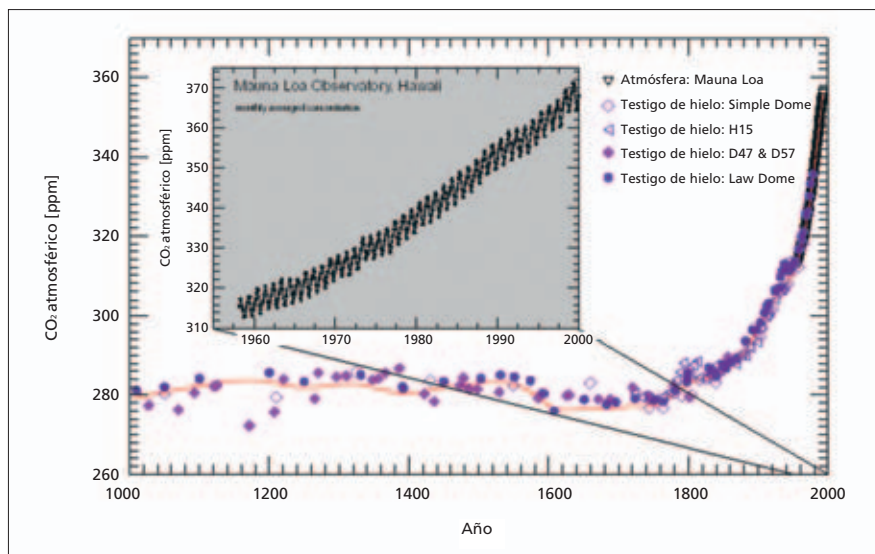


Figura 4.5. Progresión de la presión parcial de CO_2 en la atmósfera durante el último milenio.

Fuente: Sarmiento y Gruber, 2002.

Las bombas física y biológica en el océano
El secuestro de CO_2 por parte del océano tiene lugar por medio de procesos físico-químicos y biológicos. Estos procesos son conocidos como *bomba física* (o de solubilidad) y *bomba biológica*; ambos contribuyen a transportar CO_2 desde la superficie a aguas profundas, y alejarlo así de un retorno a corto plazo a la atmósfera.

La bomba física está conducida por el intercambio de CO_2 en la interfase atmósfera-océano, ya que la presión parcial de CO_2 tiende a estar en equilibrio entre la atmósfera y el océano, por lo que su aumento en la atmósfera fuerza un flujo hacia el océano. La bomba física depende, además, de los procesos físicos

que transporta CO_2 al océano profundo. El CO_2 atmosférico entra en el océano por intercambio gaseoso dependiendo de la velocidad del viento y de la diferencia de las presiones parciales entre la atmósfera y el océano. La cantidad de CO_2 captado por el agua de mar es función de la temperatura a través del efecto de la solubilidad. La solubilidad aumenta a bajas temperaturas. Así pues las aguas frías absorben más CO_2 que las cálidas.

La circulación termohalina oceánica conecta todos los océanos como una gran cinta transportadora. Así, aguas saladas y cálidas alcanzan altas latitudes en el Atlántico norte, en invierno se enfrían

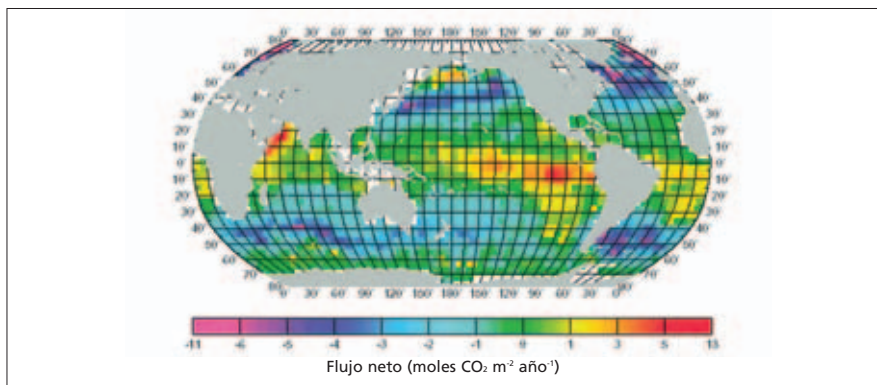


Figura 4.6. Intercambio medio anual de CO_2 ($\text{mol m}^{-2} \text{año}^{-1}$) entre la atmósfera y el océano para el año 1995. Los valores negativos denotan una captación de CO_2 atmosférico por el océano y los valores positivos su emisión del océano a la atmósfera.

Fuente: Takahashi *et al.*, 2002.

y se hundan a grandes profundidades. Este proceso es conocido como formación de aguas profundas. Desde ahí comienza su recorrido hacia el sur donde se unirá a las aguas frías profundas recién formadas alrededor de la Antártida. Entonces este flujo de agua profunda llega a los océanos Índico y Pacífico. En ambos océanos el agua profunda se dirige al norte, regresando por superficie y retornando al Atlántico donde comenzará un nuevo ciclo que dura unos mil años. En el momento en el que se forman las aguas profundas por hundimiento de aguas frías, éstas arrastran CO_2 disuelto hacia el fondo donde, a medida que circulan de un océano a otro, se van enriqueciendo en CO_2 como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica procedente de la sedimentación de la producción biológica en la superficie.

Como indica su nombre, en la *bomba biológica* interviene la biota marina. El proceso de fijación fotosintética de CO_2 en la capa iluminada del océano por el fitoplancton está compensado por la exportación de carbono orgánico (tejidos blandos) y carbonato (caparzones calcáreos) a capas profundas por gravedad (sedimentación). Así, la actividad biológica retira CO_2 de las aguas superficiales y lo transporta hacia el interior del océano en forma de carbono orgánico y carbonatos. Durante esta exportación la materia orgánica y el carbonato se van descomponiendo por acción de las bacterias y de los equilibrios químicos, respectivamente. Una pequeña parte de ambos alcanza el lecho marino y se incorpora a los sedimentos, donde quedará retenido durante largos periodos de tiempo.

Balances globales de captación de CO_2 antropogénico

El estudio de la captación de CO_2 antropogénico por el océano se puede abordar desde varios puntos de vista. Uno sitúa al observador en la capa más superficial del océano, justo donde tiene lugar el intercambio de CO_2 con la atmósfera. La figura 4.6. muestra que las zonas polares y frías actúan como sumideros de CO_2 , mientras que las zonas cálidas ecuatoriales actúan como fuentes de exhalación de CO_2 como consecuencia de su elevada temperatura y del hecho de ser zonas donde las aguas profundas, ricas en CO_2 , afloran a la superficie. El flujo de intercambio neto anual calculado por Takahashi *et al.* (2002) para 1995 fue de $2.2 \pm 0.45 \text{ Pg C año}^{-1}$.

Otra manera de abordar la captación de CO_2 es a partir de la medida de la acumulación de éste en la columna de agua a lo largo del tiempo. Así, usando datos obtenidos durante la década de los 90 (figura 4.7.), Sabine *et al.* (2004) estimaron que el CO_2 antropogénico secuestrado por el océano en el periodo 1800-1994 fue de $118 \pm 19 \text{ Pg C}$.

La distribución de CO_2 antropogénico en los océanos es función de la formación y hundimiento de masas de agua superficial y profunda en los océanos y su transporte y acumulación en las zonas subtropicales. Las regiones de afloramiento ecuatorial tiene relativamente menor cantidad de CO_2 antropogénico ya que suelen funcionar como fuentes de carbono.

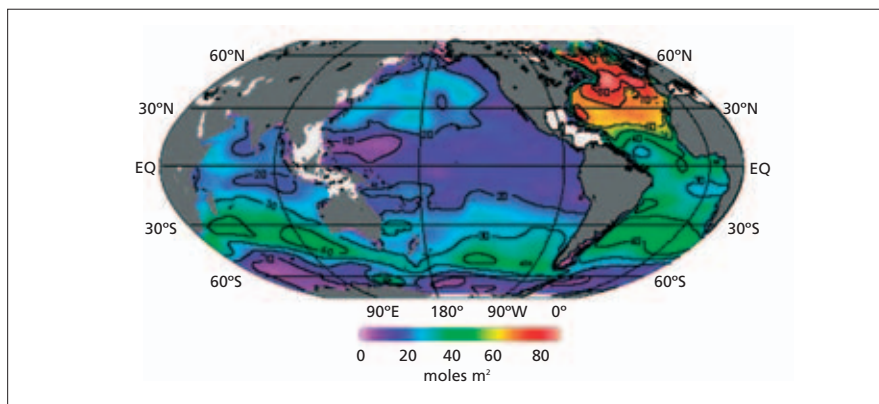


Figura 4.7. Inventario de CO₂ antropogénico en la columna de agua oceánica (mol m⁻³). Altos inventarios están asociados con formación de agua profunda en el Atlántico Norte y formación de aguas intermedias y modales entre 30° y 50° S. El inventario total oceánico entre 1980 y 1994 es de 118 ±19 Pg C.

Fuente: Sabine *et al.*, 2004.

La figura 4.7. muestra la distribución de CO₂ antropogénico con una mayor penetración de CO₂ en el océano Atlántico, disminuyendo en el océano Índico, y siendo menor en el océano Pacífico donde las aguas son más viejas. Esta distribución de CO₂ antropogénico sigue la circulación termohalina (ver cuadro 4.1.). Tanto a partir de las medidas directas de flujos de intercambio de CO₂ en superficie como a partir del inventario de CO₂ antropogénico acumulado en la columna de agua. Se puede apreciar que el Atlántico norte juega un papel muy importante en el secuestro de CO₂ por el océano.

Sabine *et al.* (2004) han calculado el papel del océano en el ciclo del carbono global durante el Antropoceno (tabla 4.2.). Aproximadamente la mitad del

CO₂ antropogénico emitido por las combustiones de fósiles y la producción de cemento en los últimos 200 años se encuentra en el 10% más superficial del océano. El balance neto terrestre de CO₂

viene expresado por la diferencia entre las emisiones del cambio de uso de la tierra y de la captación de CO₂ por la biosfera terrestre. Las estimaciones de la emisión de CO₂ debida a los cambios del uso de la tierra para el periodo 1850 a 1994 tienen una incertidumbre elevada. Teniendo en cuenta los valores de 100 a 180 Pg C adoptados por Sabine *et al.* (2004) se puede deducir que la biosfera terrestre puede haber captado entre 61 y 141 Pg C desde el Antropoceno. Comparando los dos periodos de 1800-1994 y el más reciente de las décadas de los 80 y 90, hay una indicación, aunque no estadísticamente significativa, de que la fracción de captación de carbono por parte del océano ha descendido de 28-34% a 26%. Mientras que el sumidero terrestre parece mantenerse constante dentro de la elevada incertidumbre (18-33% *versus* 28%).

Fuentes de CO ₂	1800-1994 [Pg C]	1980-1999 [Pg C]
<i>Fuentes y sumideros</i>		
1. Emisiones por combustión de fósiles y producción de cemento	244±20	117±5
2. Almacenamiento en la atmósfera	-165±4	-65±1
3. Captación y almacenamiento en el océano	-118±19	-37±8
<i>Balance terrestre neto deducido</i>		
4. Balance terrestre neto = [-(1)-(2)-(3)]	39±28	-15±9
<i>Balance terrestre</i>		
5. Emisiones por el cambio en el uso del suelo	100 a 180	24±12
6. Sumidero de la biosfera terrestre = [-(1)-(2)-(3)]-(5)	-61 a -141	-39±18

Tabla 4.2. Balance de CO₂ antropogénico para el Antropoceno (1800-1994) y para las décadas de los 1980s y 1990s.

Fuente: Sabine *et al.*, 2004.

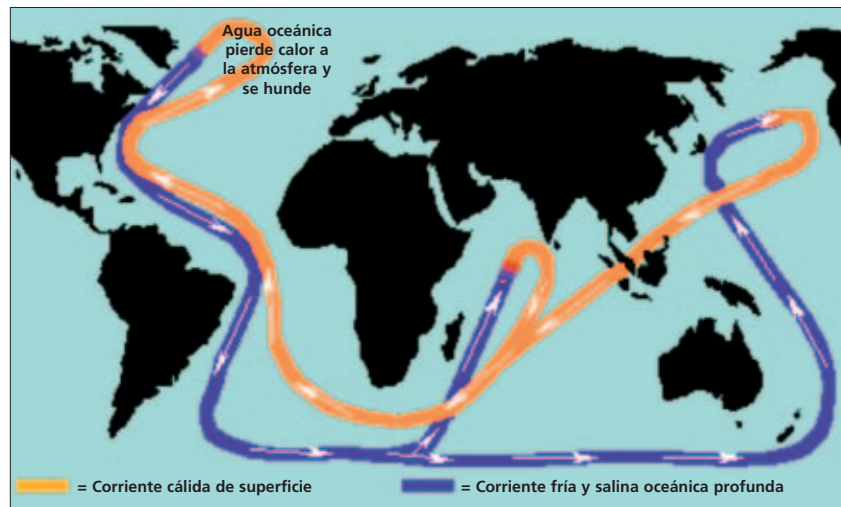
Cuadro 4.1.

Circulación termohalina

La circulación termohalina consiste en corrientes oceánicas impulsadas por flujos superficiales de aguas saladas y cálidas procedentes del Mar Caribe que alcanzan altas latitudes en el Atlántico norte donde se enfrían y hunden a grandes profundidades. Este proceso es conocido como formación de aguas profundas. Desde ahí comienza su recorrido hacia el sur donde se unirá a las aguas frías profundas recién formadas en la Antártica. Este flujo de agua profunda llega a los océanos Índico y Pacífico. En ambos océanos el agua profunda se dirige al norte, regresando por superficie y retornando al Atlántico donde comenzará un nuevo ciclo que dura alrededor de mil años.

La circulación termohalina oceánica conecta todos los océanos como una gran cinta transportadora.

Los cambios climáticos alteran el balance de agua dulce en el Atlántico Norte. Cuando la temperatura del aire aumenta, las aguas de superficie también tienden a calentarse. Este efecto es mayor en altas latitudes por deshielo debido al calentamiento. El ciclo hidrológico puede verse acelerado en una atmósfera cálida por el incremento del caudal de los ríos. Así en un futuro, el agua de mar en sus



Representación esquemática de la circulación termohalina del océano de acuerdo con Broecker (1991).

zonas de formación será cada vez más cálida y menos salada, siendo su densidad menor. Este hecho provocará una ralentización de la circulación termohalina, pudiendo llegar incluso al colapso. La ralentización o colapso de la circulación termohalina puede tener importantes consecuencias sobre el clima global, con un enfriamiento de hasta 7°C en latitudes altas del Hemisferio Norte y un calentamiento de 1 a 2°C en el Hemisferio Sur. Existe la evidencia, derivada del examen de paleoindicadores, de una relación entre cambios bruscos en climas pasados y alteraciones de la circulación termohalina.



Atardecer en el mar de Weddel (Antártida).

Fotografía: C. M. Duarte.

Ciclo del nitrógeno

La actividad humana ha perturbado la condición de estado estacionario del ciclo de nitrógeno, acelerando de forma notable su fijación. La tasa de producción de fertilizantes ha ido incrementándose de forma exponencial desde que a principios del siglo XX, el alemán Fritz Haber descubrió cómo acortar el ciclo del nitrógeno fijándolo químicamente como amonio a altas temperaturas y presiones, creando así fertilizantes que podían ser añadidos directamente al suelo. Los niveles de producción de fertilizantes de nitrógeno fueron de aproximadamente $80 \cdot 10^{12}$ g N año⁻¹ en 1995 y se prevé que supere los $140 \cdot 10^{12}$ g N año⁻¹ en 2020.

La evolución de la fijación natural y antropogénica de nitrógeno se pueden observar en la figura 4.8., en la que se aprecia el incremento exponencial de la fijación antropogénica como consecuencia del incremento en la producción de fertilizantes de nitrógeno. A principios del siglo pasado la fijación antropogénica únicamente representaba un 15% de la natural, mientras que en 1980 la fijación antropogénica se igualó a la natural, superándola en la actualidad en más del 35%.

Este enriquecimiento de nitrógeno estimula las tasas de nitrificación y desnitrificación, produciendo un incremento de N₂O en la atmósfera.

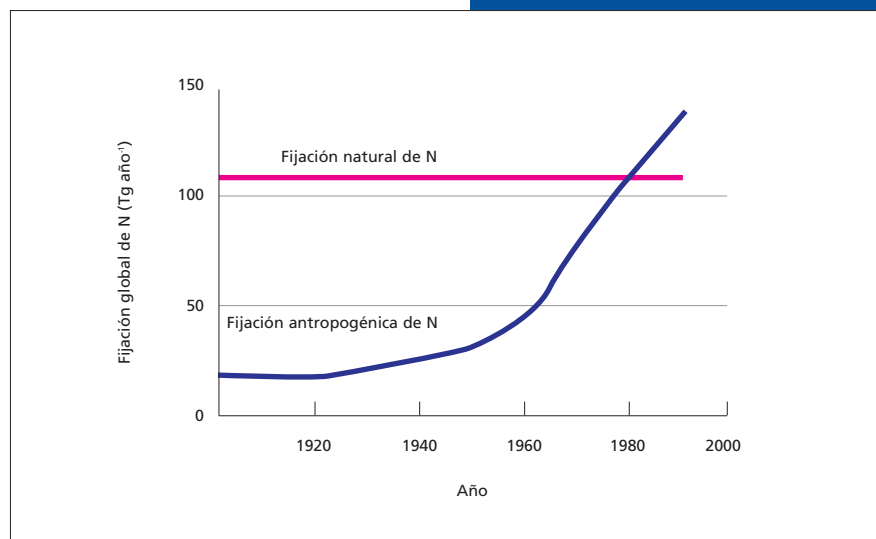


Figura 4.8. Evolución de la fijación anual de nitrógeno a través de procesos naturales y la fijación antropogénica mediante la reacción de Haber para producir fertilizantes.

También la combustión de combustibles fósiles libera actualmente alrededor de $20 \cdot 10^{12}$ g N/año⁻¹ en forma de N₂O. La concentración de N₂O en la atmósfera se incrementó desde la época preindustrial con valores de 273 ppbv a 310 ppbv en año 2000. Estos óxidos de nitrógeno forman parte de la lluvia ácida que es causante de la deforestación en partes de Europa y en el nordeste de Estados Unidos. El incremento de nitrógeno atmosférico también produce cambios en las especies dominantes y por tanto en el equilibrio del ecosistema en algunos bosques y prados. Además el incremento de óxido nítrico causa enfermedades respiratorias como el asma en niños y adultos.

Algunos fertilizantes de nitrógeno aplicados en agricultura son arrastrados por el agua de lluvia o acumulados en el agua del suelo y acuíferos subterráneos. El agua del suelo que se usa como fuente de agua potable puede provocar cáncer en humanos si contiene concentraciones excesivas de nitrógeno. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos ha establecido un estándar de nitrógeno para agua potable de 10 mg L^{-1} . En aguas que no han sido alteradas por la actividad humana, la concentración no supera 1 mg L^{-1} . El exceso de nitrógeno arrastrado por las aguas llegará a la costa a través de los ríos contaminados, generando un enriquecimiento costero en nitrógeno conocido como eutrofización, produciendo una pérdida de calidad del agua, con proliferaciones de algas que pueden dar lugar a, entre otros efectos negativos, a eventos de muerte de peces por pérdida de oxígeno disuelto cerca de la costa y cambios de la distribución de especies en el ecosistema costero afectado. De hecho, el transporte atmosférico del nitrógeno emitido a la atmósfera por la actividad humana ha llevado a que la deposición de nitrógeno al océano se duplique, posiblemente provocando un aumento de la producción primaria en el océano. El impacto de la actividad humana sobre el ciclo del nitrógeno queda también reflejado en el hecho de que tanto la exportación de nitrógeno de cuencas hidrológicas como la

concentración de nitrógeno reactivo en aguas de los ríos más importantes del planeta aumentan con la densidad de población en sus cuencas.

Las perturbaciones observadas en el ciclo global de nitrógeno tienen importantes implicaciones en el potencial incremento del efecto invernadero y sus consecuencias medioambientales, y se han producido básicamente por dos procesos antropogénicos: el incremento de la producción de fertilizantes y el uso de combustibles fósiles.

Ciclo del azufre

Dejando a un lado la resuspensión de sal marina, unos dos tercios del azufre que llega a la atmósfera, alrededor de $90 \cdot 10^{12} \text{ g S/ año}^{-1}$ se emiten por actividades humanas, sobre todo por la

combustión de carbón y petróleo y por la metalurgia. En áreas industrializadas, las emisiones antropogénicas pueden llegar a representar el 90% de las emisiones totales. La mayor parte de estas emisiones son en forma del gas dióxido de azufre (SO_2). Una parte de este SO_2 se deposita localmente de nuevo en la superficie, pero en su mayoría es oxidado en la atmósfera a ácido sulfúrico y sulfato, ambos higroscópicos, que son los principales causantes de la acidez de los aerosoles contaminados y del fenómeno de la lluvia ácida cerca y a sotavento de los grandes focos de emisión. A pesar de tener una vida media bastante corta en la atmósfera (del orden de pocos días), parte del azufre es transportado en forma de aerosol lejos de las regiones de emisión, como demuestra su detección en los hielos de Groenlandia (figura 4.9.).

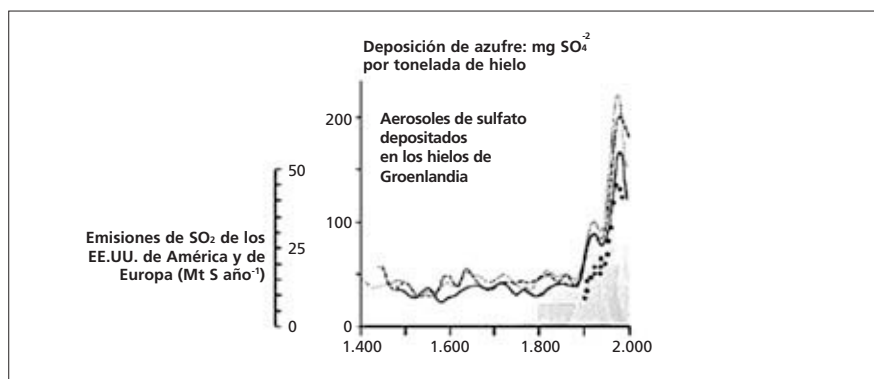


Figura 4.9. Aerosoles de sulfato depositados en los hielos de Groenlandia en los últimos seis siglos, en comparación con las emisiones de SO_2 en Europa y Estados Unidos durante el siglo XX.

Fuente: IPCC 2001.

Como fuentes de aerosol y de núcleos de condensación de agua en las nubes, las emisiones humanas de azufre a la atmósfera tienen importantes implicaciones en la química de la atmósfera, en el balance radiación y, consecuentemente, en el clima. En los países desarrollados existe una reciente pero clara tendencia a la reducción de la emisión relativa de azufre por unidad de energía generada, gracias a la utilización de combustibles menos ricos en azufre y de filtros de captura de gases azufrados. Ello persigue mejorar la calidad del aire respirado y reducir la lluvia ácida. Al mismo tiempo, sin embargo, se altera la cantidad de azufre reactivo en la atmósfera, con posibles efectos climáticos difíciles de prever y cuantificar. Esto se comentará de forma más detallada en el apartado “aerosoles” de la sección 5.4.

Las actividades humanas también afectan al transporte de azufre por los ríos. Se calcula que al menos un 28% del contenido en sulfato de los ríos se deriva de la contaminación industrial y minera, la erosión y otras actividades humanas. Alrededor de $130 \cdot 10^{12}$ g S año⁻¹ son transportados actualmente por los ríos, lo que supone aproximadamente el doble que en la época preindustrial.

En España, las emisiones de azufre a la atmósfera se concentran mayoritariamente en Galicia y Aragón, al encontrarse en estas comunidades importantes instalaciones productoras de electricidad que usan combustibles de

baja calidad. En los últimos años se están consiguiendo reducciones importantes en la emisión de azufre (de 1980 a 1990 ha disminuido en un 33%) como consecuencia de la sustitución de carbones españoles (ricos en azufre) por combustibles de importación, más limpios. De todas formas, el SO₂ de combustión sigue siendo el contaminante primario emitido en mayor cantidad después del monóxido de carbono (CO).

4.3. Emisiones de materiales a la atmósfera

La atmósfera, y especialmente la troposfera, es la parte de la biosfera más dinámica, con una renovación constante de los materiales presentes a niveles traza. Por lo tanto la atmósfera es altamente sensible a los procesos biogeoquímicos de la biosfera y especialmente a las perturbaciones antropogénicas. No en vano, las primeras evidencias experimentales de los cambios de composición de la biosfera durante el Antropoceno provinieron de medidas del contenido de CO₂ y ozono en series temporales en la baja atmósfera. El carácter dinámico de la atmósfera en la biosfera también es evidente si se consideran los procesos atmosféricos relevantes para los ciclos biogeoquímicos. La atmósfera es el gran reactor químico del sistema Tierra, especialmente por la potente capacidad oxidativa que tienen el

ozono y los radicales hidroxilo (OH) (Seinfeld y Pandis, 1998). Esta capacidad oxidativa está además muy influenciada por las emisiones a la atmósfera de compuestos orgánicos biogénicos y antropogénicos que han modificado, por ejemplo, la concentración troposférica de radical OH y de ozono. El transporte atmosférico de materiales es muy eficiente y los tiempos de mezcla a escala hemisférica son de solamente dos semanas. Esto implica que las emisiones regionales de una sustancia o grupo de sustancias, si éstas tienen vidas medias atmosféricas de unos días, pueden ser transportadas a larga distancia, llegando a otras regiones planetarias. Estos fenómenos de redistribución de sustancias antropogénicas han sido validados extensamente al identificarse, por ejemplo, contaminantes orgánicos provenientes de la actividad urbana e/o industrial en zonas de montaña remotas, o incluso en zonas antárticas o árticas.

Por lo tanto, la atmósfera juega un papel muy importante en los procesos de cambio global, ya que da lugar a que actividades y actuaciones locales o regionales tengan implicaciones a escala global, y al contrario, una determinada región recibe un impacto como consecuencia de actividades y políticas realizadas en otras partes del planeta. Finalmente, la atmósfera es el vector común de todo el sistema Tierra. Por lo tanto las emisiones de materiales a la atmósfera, sean estas primarias



El buque de investigación oceanográfica *Hespérides* entre hielos en el estrecho de Gerlache, Península Antártica.
Fotografía: C. M. Duarte.

(directamente de actividades antropogénicas) o secundarias (emisiones ambientales o difusas pero inducidas por perturbaciones antropogénicas o por la propia dinámica de los ciclos biogeoquímicos), son importantes para entender los procesos de cambio global en el Antropoceno.

De entre las emisiones de materia a la atmósfera destacan aquellas que provienen del uso de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas). A parte de las emisiones de CO₂, y debido a la baja eficiencia de los procesos de combustión, se emiten grandes cantidades de monóxido de carbono y compuestos orgánicos (carbono reducido) volátiles y semi-volátiles (Seinfeld and Pandis, 1998). Estos compuestos serán en parte oxidados a la atmósfera pero una fracción significativa terminará depositándose a los ecosistemas marinos y continentales (Jurado *et al.*, 2005) con un impacto ambiental sustancial. Además de hidrocarburos y otros compuestos orgánicos, el uso de combustibles fósiles implica la emisión de cantidades ingentes de azufre y nitrógeno, que también representan una perturbación de los ciclos biogeoquímicos. Incluso si la reglamentación de emisiones de nitrógeno se cumple de aquí al 2030, la deposición de este nutriente fundamental para los ecosistemas puede generar problemas de eutrofización en muchas regiones. Las emisiones de azufre antropogénico, por ejemplo, ya superan

las biogénicas, con unas implicaciones desconocidas en la formación de los núcleos de condensación atmosféricos y la regulación del albedo terrestre. Las emisiones de hollín han aumentado en un factor de diez durante el Antropoceno y tienen también un efecto significativo en el balance radiativo del sistema Tierra (IPCC, 2001). El uso de combustibles fósiles también ha conllevado un incremento, por un factor de 10, en las emisiones de plomo y otros metales y compuestos orgánicos.

De todas maneras, las emisiones a la atmósfera y los cambios que ha sufrido la composición de la atmósfera no se deben, ni mucho menos, solamente al uso de combustibles fósiles. Hay muchas otras actividades, que incluyen el distinto uso de la tierra, la aplicación de fertilizantes en agricultura, la cría de ganado y otras actividades que ha incrementado las emisiones de N, afectando el ciclo del carbono, aumentando los gases con efecto invernadero, como el metano, e introduciendo compuestos sintéticos utilizados como herbicidas y plaguicidas (Schwarzenbach *et al.*, 2003). Evidentemente, infinidad de actividades industriales y urbanas diversas han conllevado la introducción de grandes cantidades de compuestos antropogénicos a la atmósfera. De hecho, la civilización humana usa en la actualidad más de 100.000 productos sintéticos (Schwarzenbach *et al.*, 2003),

que no estaban presentes en la biosfera antes del Antropoceno, y han usado muchos más, algunos de ellos muy persistentes, durante el siglo XX. Durante lustros, ha habido un control y legislación más bien laxos con respecto al impacto potencial de estas sustancias. Se desconoce el número, e incluso la composición de muchas de las sustancias que se han introducido en los diversos ecosistemas. Hasta la actualidad se han identificado en la atmósfera más de un millar de compuestos sintéticos que no estarían en la atmósfera si no fuera por la actividad humana, y por lo tanto atestiguan cambios ambientales propios del Antropoceno. Algunas de estas sustancias, una vez en la atmósfera pueden contribuir al efecto invernadero. Se desconoce el número de sustancias antropogénicas que han llegado a la atmósfera, y a la biosfera en general, y el esfuerzo de investigación a cerca de ellas es limitado, no solamente por los recursos que se les destina, sino también por las tecnologías analíticas disponibles. (Muir y Howard, 2006).

4.4. Nubes, hielo, aerosoles y albedo

El albedo

El albedo de un planeta es uno de los motores de su clima, puesto que determina cuánta de la radiación solar

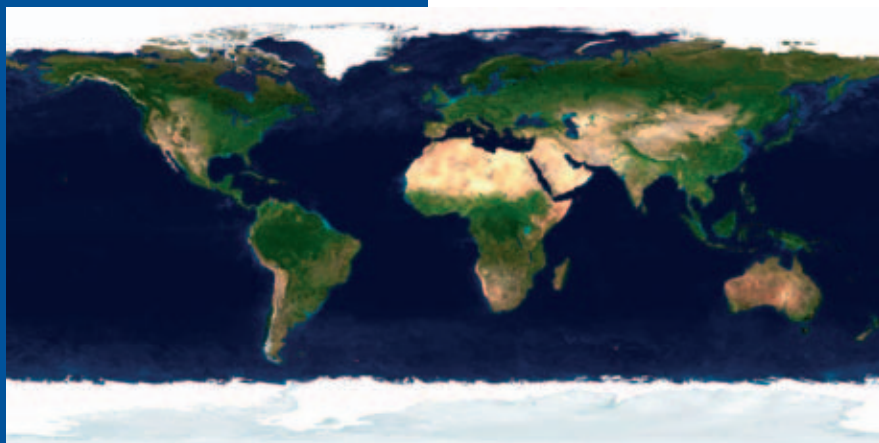


Figura 4.10. Imagen compuesta de fotografías de radiación visible tomadas con el sensor MODIS del satélite TERRA (NASA). Arriba, las nubes han sido eliminadas mediante manipulación de la imagen. Nótese el efecto de las nubes y del hielo sobre el albedo del planeta, particularmente sobre la superficie oscura de los océanos.

recibida es reflejada de nuevo hacia al espacio y cuánta es absorbida y disipada en forma de calor. En el caso de la Tierra, el albedo planetario depende del color y características de las superficies terrestre y marina, de la cobertura de nubes y de la

concentración de aerosoles. La superficie oscura del océano abierto, lo mismo que una superficie terrestre cubierta de vegetación espesa, tienen albedos del orden del 10% (es decir, reflejan tan sólo un 10% de la radiación solar que reciben), mientras que las superficies heladas o nevadas, y las nubes, tienen albedos de entre el 20 y el 80%.

Las nubes

Una Tierra sin nubes tendría un albedo medio global del 15%, la mitad del 30% que tiene por efecto de las nubes (figura 4.10.).

Ello supone que las nubes actúan como un parasol muy efectivo. Es cierto que las nubes también retienen calor que emana de la Tierra; es bien sabido que las noches despejadas suelen ser las más frías. Pero, en conjunto, domina el efecto parasol y las nubes ejercen un efecto enfriante estimado en unos -20 W m^{-2} en presencia de nubes en relación a cielos despejados. Los modelos climáticos prevén una mayor evaporación del agua de océano en condiciones de calentamiento global. Ello conllevaría un aumento de la cobertura de nubes y un probable reforzamiento de su efecto enfriante. Las predicciones en este sentido, sin embargo, son muy inciertas, puesto que la capacidad relativa de una nube para reflejar la radiación o para retener el calor depende de sus características microfísicas (número y

tamaño de las gotas de agua o hielo) y su altitud en la atmósfera, lo cual es difícil de modelizar con rigor y fiabilidad.

Los hielos

En el caso de los hielos, su efecto enfriante es doble. Por una parte, como ya se ha comentado, la presencia de hielo o nieve aumenta muchísimo el albedo de océano y continentes. Por otro lado, la cubierta de hielo reduce el intercambio de calor entre el océano y la atmósfera, y la evaporación. Una mayor extensión de los hielos polares supone una menor retención energética, y condiciones más favorables para la expansión del hielo y viceversa. Se cree que esta retroacción positiva explica en parte las velocidades de transición entre periodos glaciales e interglaciales que ha venido experimentando la Tierra. Reducciones y redistribuciones de insolación por causas orbitales habrían supuesto la expansión del océano helado y el aumento de la radiación reflejada, con el consiguiente enfriamiento adicional. El efecto opuesto aceleraría las terminaciones de las épocas glaciales. En lo que respecta al cambio global actual tanto las observaciones como los modelos de predicción alertan sobre una reducción de la extensión del océano helado en los polos como consecuencia del calentamiento. Este fenómeno es especialmente acusado en el Ártico, donde el grosor de la banquisa ha disminuido en un 40% en los últimos

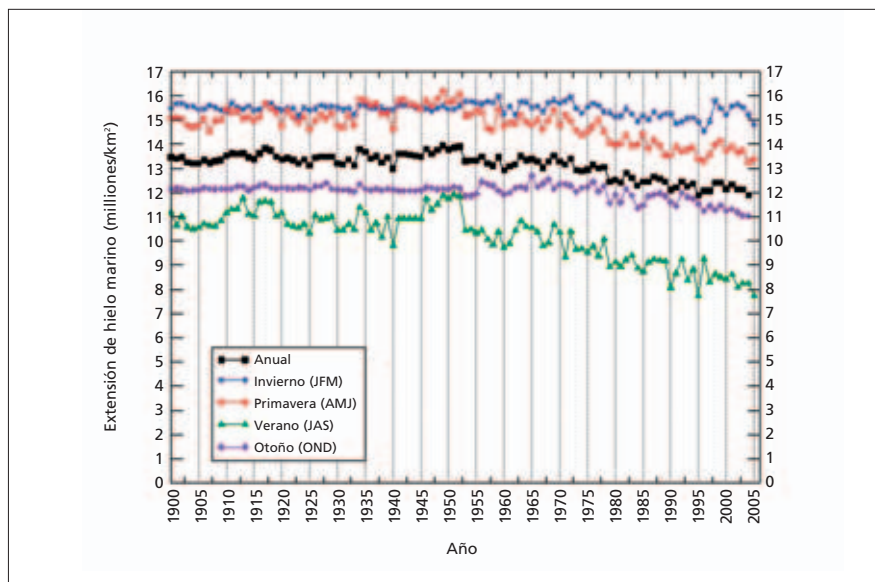


Figura 4.11. Extensión del hielo marino en distintas estaciones en el Hemisferio Norte.

Datos de la NOAA y W. Chapman, Universidad de Illinois.

años, y su área de extensión se ha reducido en más un 14%, con una disminución en la extensión estival del hielo en el Hemisferio Norte desde 11 a 8 millones de km² (figura 4.11.). De hecho, la reducción de la extensión de hielo en el Ártico parece acelerarse en los últimos años, lo que puede deberse a efectos sinérgicos entre la reducción de la cubierta de hielo y el calentamiento más rápido del océano Ártico. Además de ejercer una retroacción positiva sobre el clima, la desaparición paulatina de la banquisa de hielo en el Ártico central tendría un enorme impacto socioeconómico, tanto

para las comunidades autóctonas, cuya forma de vivir está basada en el hielo, como para el conjunto de las sociedades de los países colindantes, puesto que supondría la apertura de rutas marítimas mucho más directas.

Los aerosoles

Definimos “aerosoles” como pequeñas partículas suspendidas en el aire. Representan un componente más de la atmósfera, componente que, según su composición y tamaño, interviene en procesos tan importantes como la



Investigadores del CSIC desarrollando el primer experimento de mesocosmos en aguas antárticas.

Fotografía: Susana Agustí.

formación de nubes, la absorción y dispersión de radiación solar, o el transporte y deposición de elementos nutrientes y contaminantes. A pesar de que existen múltiples fuentes naturales de aerosoles, como la suspensión de sal marina y polvo por el viento, las erupciones volcánicas o la oxidación de compuestos volátiles liberados por las masas vegetales, la actividad humana ha aumentado enormemente las emisiones y concentración de partículas en la atmósfera. El uso masivo de combustibles fósiles en regiones industrializadas y urbanas conlleva la emisión de grandes cantidades de partículas de combustión (hollín) y de óxidos de azufre que serán oxidados a partículas de sulfato. La quema de biomasa con finalidades agrícolas o de deforestación en regiones tropicales también supone la emisión de grandes cantidades de hollín. La explotación de canteras y minas y la exposición y movilización de suelo árido con fines urbanísticos o de grandes infraestructuras también suponen un aumento de las fuentes de polvo.

El impacto de los aerosoles en el clima es de naturaleza doble (Penner *et al*, 2001). Hay en primer lugar un efecto directo sobre la radiación solar. En función principalmente de su contenido en hollín (carbono negro), un aerosol puede absorber o dispersar la radiación. Contenidos elevados de hollín (bajo albedo) hacen que la partícula absorba radiación y contribuya a calentar la

atmósfera. Niveles de hollín bajos (albedo alto) hacen que la partícula disperse la radiación y una parte sea devuelta al espacio, con su consiguiente efecto refrigerante. En conjunto, este efecto directo de los aerosoles se estima como refrigerante y de una magnitud aproximada de -0.6 W m^{-2} . En segundo lugar, existe el efecto indirecto, por el cual los aerosoles intervienen en la formación de las nubes e influyen en su albedo (a más aerosoles, mayor es el número de gotas pequeñas de una nube y mayor su albedo) y en su tiempo de vida (a más aerosoles, más tardan las gotas en crecer lo suficiente como para precipitar en forma de lluvia). Este efecto indirecto, también refrigerante, es muy difícil de cuantificar, pero se estima en un mínimo de -1.5 W m^{-2} .

En conjunto, los aerosoles ejercen un forzamiento sobre el balance de radiación, y por lo tanto sobre el clima, cercano en magnitud pero de signo opuesto al que ejerce el aumento de gases de efecto invernadero desde la Revolución Industrial. De hecho, en el planteamiento de políticas de mitigación del cambio global, los aerosoles constituyen una paradoja. Si se apuesta por energías renovables y tecnologías de combustión limpias, con el objeto de reducir las emisiones de CO_2 y de contaminantes, la consiguiente reducción de aerosoles en la atmósfera puede conllevar un efecto de calentamiento de magnitud parecida al que se pretende paliar.

4.5. Contaminantes y nuevas sustancias en la biosfera

A parte de la modificación de la abundancia de metales, nutrientes y compuestos orgánicos que ya estaban presentes en la biosfera antes del Antropoceno, las actividades humanas han introducido millares de compuestos nuevos, la mayoría orgánicos en el medio ambiente (Schwarzenbach *et al.*, 2003). Hay múltiples ejemplos, algunos paradigmáticos. Entre los compuestos orgánicos que se han usado para el control de insectos destaca el DDT, muy usado, incluso hoy en día para el control de malaria (control de los mosquitos). Los policlorobifenilos (PCBs) se usaron durante más de cincuenta años en centenares de aplicaciones entre las que destacan su uso como fluido dieléctrico en transformadores eléctricos. Actualmente los PCBs se encuentran distribuidos en absolutamente toda la biosfera, desde los ecosistemas polares a la sangre de cualquier humano. Posteriormente, estos compuestos se han sustituido por otros con propiedades y problemáticas parecidas (policloronaftalenos, polibromodifenil éteres). Durante el último tercio del siglo veinte, el uso doméstico y sobretodo industrial de detergentes aniónicos (nonilfenoles polietoxilados), hizo incrementar la concentración de nonilfenoles, que tiene propiedades estrogénicas, en los ecosistemas acuáticos de los países occidentales, también en

España. Posteriormente éstos se volatilizan y pueden afectar ecosistemas remotos como los ecosistemas marinos.

Actualmente, el uso polibromodifenil éteres como retardantes de llama en una diversa gama de productos de consumo (ordenadores, sillas, etc., introduce en la atmósfera y toda la biosfera estos compuestos que son altamente bioacumulables y persistentes. Todas estas sustancias, una vez entran en la biosfera se redistribuyen en todos los medios (atmosférico, acuoso, vegetal...) mediante los procesos esquematizados en la figura 4.12, y por lo tanto con un potencial nocivo para ecosistemas muy diversos. Se podrían poner centenares de ejemplos más en donde una cierta actividad que se considera normal en las sociedades contemporáneas conlleva la emisión de sustancias nocivas para el medio ambiente y para los humanos (Schwarzenbach *et al.*, 2003). Incluso, el uso de productos farmacéuticos, que naturalmente es del todo necesario y pertinente y tiene la finalidad de sanar, conlleva también un impacto ambiental ya que éstos, por ejemplo, se pueden encontrar en concentraciones no despreciables en ríos y otros ecosistemas, tal como ya pasa en nuestro país.

Parte del problema ha sido que durante muchas décadas no había una legislación adecuada que regulara el uso de compuestos sintéticos teniendo en cuenta su impacto ambiental. También es cierto que esto está actualmente mejor regulado

con las nuevas directivas comunitarias, aunque, debido al carácter de la economía global, y a que sustancias emitidas en otras regiones planetarias pueden transportarse atmosféricamente, estas directivas no impiden el impacto de sustancias que se depositan por vía atmosférica en zonas donde no se han usado. En todo caso, aquí también hay unas limitaciones operativas debido a las técnicas analíticas disponibles, ya que es imposible hacer un inventario de todas las sustancias sintéticas que se encuentran en el medio ambiente que deben ser millares, sino más.

De hecho, existe un tratado internacional, similar al tratado de Kioto para las emisiones de CO₂, que es el tratado de Estocolmo para los POPs (siglas de “persistent organic pollutants”) que regula la producción y las emisiones de doce familias de contaminantes orgánicos que son persistentes en el medio ambiente, se bioacumulan en los organismos y que por sus propiedades físico-químicas pueden transportarse a larga distancia en el medio ambiente. Además, la Unión Europea regula el uso de muchas más.

A pesar de esto, hay aún docenas de familias de contaminantes orgánicos que no se regulan eficientemente, e incluso la legislación vigente no se cumple en todos los casos. Los riesgos para la salud humana son múltiples incluyendo, entre otros, alergias, enfermedades respiratorias, desórdenes reproductivos, cáncer. Estos contaminantes implican riesgos sanitarios

Destino ambiental de los contaminantes orgánicos

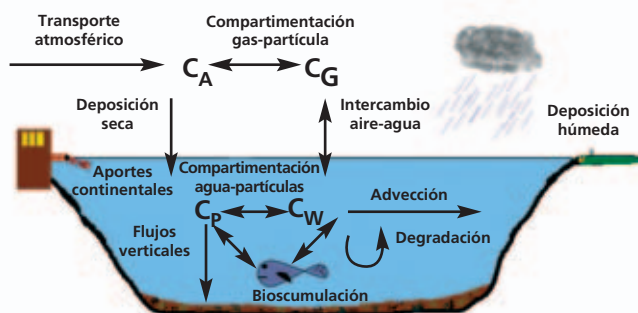


Figura 4.12. Ciclo y compartimentación de los contaminantes orgánicos en el medio ambiente.

Fuente: Jordi Dachs.

importantes igualmente para los organismos silvestres, impactando de forma importante sobre los ecosistemas, particularmente en los organismos apicales de las cadenas tróficas, en los que se bioacumulan los contaminantes. Así, los cetáceos y atunes muestran altos niveles de contaminantes, y los inuit, un pueblo eminentemente cazador, se encuentran entre los pueblos con niveles más altos de contaminantes en el planeta (Kuhnlein y Chan, 2000).

Efectivamente, los humanos estamos expuestos continuamente a millares de sustancias químicas orgánicas, muchas de las cuales aún no han recibido la debida atención por la comunidad científica, y la legislación siempre va 10-15 años por atrás con respecto a los resultados científicos. Ello no quiere decir que todas las sustancias que llegan al medio ambiente sean nocivas, algunas no lo son, pero en muchos casos se introducen nuevas

sustancias al medio ambiente sin que se conozcan sus efectos. En todo caso, la emisión de sustancias nuevas al medio ambiente no es una cuestión que pueda resolverse completamente, sino que solamente se puede llegar a controlar de manera que ésta no sea demasiado grande y se mantenga en unos límites aceptables. El problema actual es que es muy difícil saber el número de sustancias nuevas que se han introducido en el medio ambiente y la estructura de muchas de ellas. El vacío normativo que ha permitido liberar miles de sustancias sintéticas al ambiente sin conocer sus efectos sobre la salud humana y ambiental está siendo afrontado por la nueva directiva, pionera en el mundo, sobre registro, evaluación y autorización de sustancias químicas de la UE (normativa REACH, ver ec.europa.eu/environment/chemicals/reach/reach_intro.htm) que entrará en vigor el próximo 1 de junio.

4.6. Desertificación, cambios en el uso del suelo

La desertificación se define como el proceso de degradación del suelo que afecta a zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas causadas, entre otros, por cambios climáticos y antrópicos. Este proceso acarrea la reducción del potencial productivo de los recursos superficiales y subsuperficiales y, por tanto, la disminución de la capacidad de mantener

la población de forma sostenible. Conviene resaltar que el origen de los procesos de desertificación está siempre ligado a la acción intencionada del ser humano. La vulnerabilidad a la desertificación depende del clima, el relieve, las condiciones de los suelos y la vegetación, así como de la gestión de los recursos naturales. Entre las malas prácticas de la gestión ambiental se encuentran la deforestación, el manejo agrícola deficiente y el sobrepastoreo. Estas actividades humanas pueden producir el deterioro del suelo (erosión física, degradación física, salinización, etc.) y/o la destrucción de la cubierta vegetal. Evidentemente, la desertificación sólo resulta posible en regiones sensibles donde existe un determinado grado de aridez climática, como es el caso de las regiones con clima mediterráneo.

La desertificación: un problema presente y futuro

La desertificación ha sido una preocupación medioambiental constante de los organismos internacionales desde hace décadas. Sin duda, el punto de inflexión se produce en 1977 con la celebración en Nairobi (Kenia) de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre la desertificación. Estas iniciativas internacionales continuaron con la firma del Acta del Convenio de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CLD), aprobada en París en 1994, donde

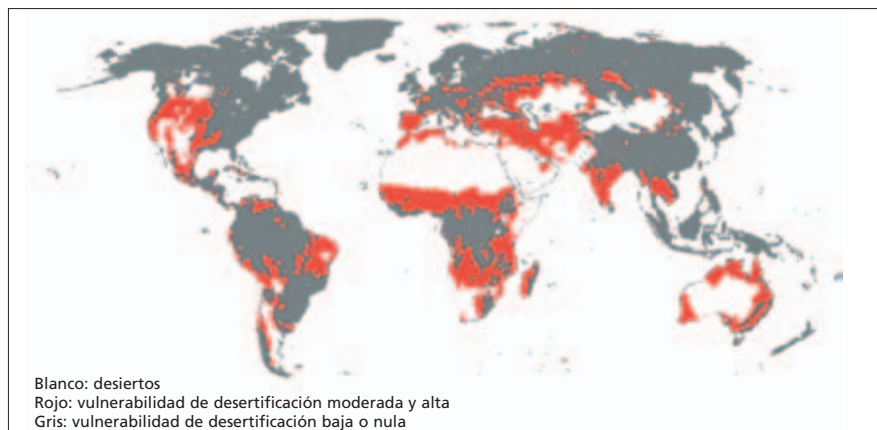


Figura 4.13. Situación de las regiones más vulnerables a la desertificación (en rojo)

Fuente: USDA-NRCS Soil Survey Division, www.earthaction.org/eng/resourcesDV.html, 08/06/2006.

se asume la gravedad del problema y sus efectos ambientales y socioeconómicos, a la vez que se insta a los países firmantes a realizar un diagnóstico del problema y a desarrollar y aplicar las medidas necesarias para combatir dicho fenómeno. Durante la Cumbre del Milenio, celebrada en Nueva York en el año 2000, los 189 estados miembros de Naciones Unidas adoptaron la Declaración del Milenio cuyos objetivos incluyen la sostenibilidad medioambiental y la lucha contra la desertificación. En este documento se establecen una serie de metas cuyo cumplimiento se puede medir a través de indicadores concretos que deberán ser alcanzados en el año 2015. Como primer paso, la Asamblea General de Naciones Unidas declaró el 2006 “Año Internacional de los Desiertos

y de la Desertificación” (AIDD), como instrumento para erradicar la pobreza en las áreas rurales de las zonas áridas y de abordar los problemas medioambientales y socioeconómicos existentes en las zonas desérticas o en proceso de desertificación.

En España, las actuaciones y programas oficiales en relación con la desertificación que se remontan a 1981 con el desarrollo del proyecto de “Lucha contra la desertificación en el Mediterráneo” (LUCDEME), realizado por el ICONA (Instituto Nacional de Conservación de la Naturaleza) y que en la actualidad sigue vigente a través de la Dirección General para la Biodiversidad (DGB) del Ministerio de Medio Ambiente. Desde su inicio, el proyecto LUCDEME ha generado más de 240 trabajos en forma de estudios,

Riesgo de desertificación	Nº de subcuencas	Superficie (km²)	Proporción
Muy alto	42	56.053	11,08%
Alto	74	103.284	20,41%
Medio	72	109.712	21,68%
Bajo	46	70.728	13,98%
<i>Total zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas</i>	<i>234</i>	<i>339.776</i>	<i>67,14%</i>
Zonas húmedas y subhúmedas húmedas	106	166.284	32,86%
<i>Total nacional</i>	<i>340</i>	<i>506.061</i>	<i>100,00%</i>

Tabla 4.3. Superficie afectada por riesgo de desertificación en España.

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente.

evaluaciones, mapas temáticos, investigaciones, formulaciones y aplicaciones técnicas acerca del proceso de desertificación en zonas áridas y semiáridas de nuestro país.

La extensión de las regiones con problemas de desertificación ha sido objeto de diversos trabajos recientes, señalando en algunos de ellos las preocupantes previsiones a corto y medio plazo (horizontes del 2050 y 2075) bajo distintos escenarios climáticos y socioeconómicos. La mayor parte de la zonas que se señalan como de riesgo de desertificación grave se localizan en torno a las actuales zonas desérticas (figura 4.13.), afectando a la tercera parte de la superficie terrestre y a las dos terceras partes de los países del mundo, habitados por más de 1.000 millones de personas (una sexta parte de la población).

El 70% de los 5.200 millones de hectáreas de tierras secas que se utilizan con fines agrícolas en todo el mundo ya está degradado (Lean, 1995). Se estima

que en 2025 las tierras cultivables disminuirán en dos tercios en África, un tercio en Asia y en una quinta parte en América del Sur. Asia posee la mayor superficie de tierras afectadas por desertificación, y el 71% de ellas están entre moderada y gravemente degradadas. En América Latina la proporción es del

75%. África, donde dos tercios de la superficie son tierras desérticas o secas, es el continente que se enfrenta a la mayor amenaza de desertificación dado que el 73% de las tierras secas agrícolas están entre moderada y gravemente degradadas (Lean, 1995). Esta desertificación conlleva la disminución de la capacidad de mantener la población de forma sostenible, lo que podría ocasionar importantes movimientos migratorios de trasfondo ambiental.

Por su parte, España es el país más árido de Europa, con un 67% del territorio potencialmente amenazado por la desertificación, especialmente la vertiente mediterránea, Valle del Ebro y la cuenca del Guadalquivir (tabla 4.3., figura 4.14., Programa de Acción Nacional contra la Desertificación, PAND, del

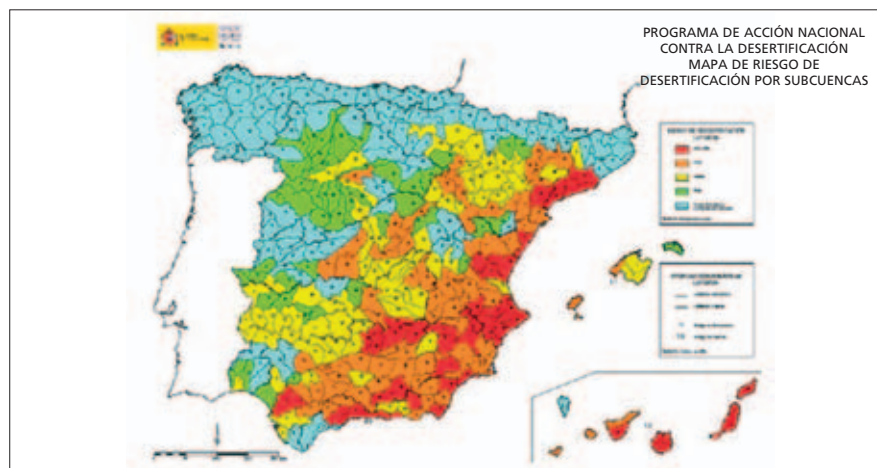


Figura 4.14. Mapa de riesgo de desertificación por cuencas hidrológicas (riesgo creciente del azul al rojo).

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente.

Ministerio de Medio Ambiente). En estas regiones existen igualmente otros problemas que favorecen la aridificación como la salinización del suelo y del agua, incendios forestales, y la sobre-explotación de los recursos naturales. En 1991, los costes económicos directos relacionados con la erosión del suelo ascendían a 280 millones de euros y los costes de las medidas de regeneración exigían un desembolso de unos 3.000 millones de euros en un periodo de 15-20 años. Las últimas inversiones anunciadas por el Ministerio de Medio Ambiente durante 2005 en materia de lucha contra la desertificación superaban los 8.000 millones de euros, afectando a Murcia, Andalucía, Extremadura, Cataluña, Aragón y Comunidad Valenciana.

Desertificación y aridificación en el clima

Se ha puesto de manifiesto que la desertificación aparece exclusivamente relacionada con la acción del ser humano. Por tanto, la desertificación puede afectar a cualquier ecosistema sensible, independientemente de su localización. Esta sensibilidad del territorio aparece estrechamente ligada a las condiciones climáticas, especialmente aquellas con tendencia a la aridificación, en las que se producen situaciones episódicas, periódicas o permanentes de carencia de agua. Los climas áridos, semiáridos y subhúmedos secos, donde existe una alta variabilidad

interanual y estacional de la precipitación, presentan condiciones climáticas sensibles que contribuyen a agravar y a acelerar los procesos ligados a la desertificación. En estas zonas, los periodos prolongados de sequía, o la irregularidad de las precipitaciones en forma de tormentas de elevada intensidad, aceleran los procesos locales o regionales que conducen a la desertificación. Por tanto, podemos afirmar que la explotación excesiva del territorio por parte de ser humano, en ecosistemas áridos y semiáridos, puede acarrear la desertificación del mismo.

En la definición de desertificación, tomada de la *Agenda 21*, se menciona la variabilidad climática como factor que incide como causa directa en el proceso de degradación del paisaje. De esta manera, se establece una relación implícita entre cambio climático y la posible extensión de las áreas con problemas de desertificación. En primer lugar, el cambio climático puede producir la expansión o contracción de las áreas con climas semiáridos y subhúmedos, alterando la extensión de las regiones sensibles a la desertificación. Por otro lado, el cambio climático afecta a la frecuencia y severidad de las sequías capaces de causar la aridificación del territorio que, aunque no necesariamente, pueden contribuir o acelerar los procesos de desertificación. En cualquier caso, el cambio climático, aun no siendo causante de la desertificación, puede agravar una situación derivada de la gestión no sostenible del territorio.

Desertificación en el contexto de cambio climático

Las previsiones de calentamiento global del planeta apuntan al aumento de la frecuencia de años secos y precipitaciones de alta intensidad en numerosas partes del mundo. En las zonas mediterráneas, los cambios en el clima pueden modificar los patrones de magnitud y frecuencia de estos eventos extremos (sequías, inundaciones, tormentas) aumentando la vulnerabilidad a la desertificación del territorio. De hecho, en el informe Acacia (escenario HADCM2) se señala que el principal riesgo en los países del sur de Europa se deriva de las crecidas relámpago debidas a lluvias torrenciales, así como de los riesgos asociados a las sequías. En este informe, se indica que para el 2020, los veranos anómalamente calurosos, como el producido en el 2003, ocurrirán con una frecuencia entre cuatro y cinco veces mayor que en la actualidad.

Las sequías suelen tener una amplia duración temporal (varios años), con efectos lentos sobre regiones extensas que ejercen un fuerte impacto en la agricultura. Las restricciones de agua y las escasas cosechas ocurridas al inicio de los años 90 ponen de manifiesto la vulnerabilidad de la región mediterránea, produciéndose pérdidas en la agricultura del sur de España por unos 4.500 millones de euros y 20.000 empleos. Sin embargo, estas sequías constituyen parte del régimen hidroclimático

Vientos catabáticos descienden del
continente Antártico hacia la costa en
Bahía Esperanza, Península Antártica.

Fotografía: C. M. Duarte.



mediterráneo, habiéndose producido periodos con frecuentes sequías tanto durante el siglo XX, como en siglos precedentes. Los eventos de sequías más severas de los últimos 500 años comprenden a las décadas centrales del siglo XVI (1540-1570) y del siglo XVII (1625-1640), con menos severidad en 1750-1760 y finalmente entre 1810-1830 y 1880-1910 (Barriendos, 2002). El mayor avance de la desertificación se produce cuando el periodo de sequía se produce después de la puesta en actividad de nuevas zonas agrícolas y ganaderas. En estas condiciones de aridez se aceleran los procesos de erosión y degradación de los suelos desprotegidos, y por tanto, la desertificación del territorio.

Por su parte, las lluvias torrenciales, capaces de generar inundaciones importantes en el área mediterránea, presentan la energía suficiente para erosionar los niveles más fértiles del suelo, produciendo una disminución en el potencial del suelo como soporte de la vegetación. Estos eventos de precipitación intensa ocasionan que la erosión hídrica en climas semiáridos se produzca de forma episódica y en relación con estos eventos de lluvia extrema. Evidentemente, el mayor impacto de estas lluvias torrenciales se centra en aquellos suelos sin protección de la cubierta vegetal, o donde concurre algún grado de alteración previa en las propiedades físicas o químicas. En general, se puede establecer un valor mínimo de

precipitación de entre 30 y 60 mm por día a partir del cual se desencadena la escorrentía superficial capaz de acarrear un flujo elevado de sedimentos (S. Bautista, citado en Vallejo *et al.*, 2005). Por ejemplo, en campos de barbecho la erosión de una lluvia de 60 mm por día puede producir tasas de erosión de hasta 300 toneladas por hectárea, principalmente en forma de regueros y cárcavas, cuando la erosión media anual en condiciones normales es del orden de 8 toneladas por hectárea (De Alba *et al.*, 1998). En el futuro, los datos existentes apuntan a que el calentamiento global puede generar un aumento en la irregularidad del régimen de lluvias y promover la generación de crecidas relámpago en las cuencas mediterráneas y del interior de la Península Ibérica (Benito *et al.*, 2005).

La perspectiva futura de la desertificación en las zonas vulnerables del mundo, y en España en particular, en relación con los impactos del cambio climático, resulta pesimista y motivo de preocupación, poniendo como causa la sostenibilidad del territorio en condiciones de aridificación del clima. A nivel global, las perspectivas y las problemáticas varían en función del desarrollo económico y tecnológico de los países. Así, en el sur de Europa, se espera que las zonas con matorral improductivo se expandan en el futuro, mientras que en el norte de África, la mayor parte de las áreas de pastoreo en matorral estepario darán paso al desierto antes de 2050. Paralelamente, la presión

demográfica sobre el territorio contribuye a desestabilizar estos sistemas vulnerables, al aumentar las actividades humanas que suponen riesgo de degradación en ambientes áridos y semiáridos, en particular, el sobrepastoreo, y los manejos agrícolas inapropiados (e.g. barbecho blanco en zonas marginales), los fuegos forestales, la salinización del suelo y del agua relacionada con la agricultura intensiva, y la reducción de la calidad del suelo en general.

Igualmente, la desertificación puede afectar a nivel global en el intercambio del carbono, modificando el albedo, reduciendo la biodiversidad, y aumentando la degradación y la erosión del suelo. La vegetación en las zonas áridas y semiáridas almacena una cantidad importante de carbono, superando las 30 toneladas por hectárea, que se reduce a medida que la vegetación desaparece. Por otro lado, los suelos de las zonas secas almacenan en términos de volumen total de carbono mundial una importante cantidad de carbono, cuya destrucción puede afectar al ciclo del carbono, incrementando el efecto invernadero.

4.7. Detección y observación de perturbaciones

La detección del cambio global y su impacto en los ecosistemas así como de las anomalías y las respuestas a las perturbaciones requiere, por un lado,

observaciones locales finas y prolongadas en el tiempo, y conectadas entre sí mediante redes de sistemas de observación, y, por otro lado, observaciones sinópticas de menor resolución pero de escala global.

Series temporales y redes de sistemas de observación

Las series temporales de observación suponen el núcleo central de la investigación sobre cambio global y cambio climático, pues permiten comprobar cambios en tendencias y variaciones con respecto a patrones estadísticamente representativos. Sin embargo, las observaciones sostenidas del sistema Tierra son relativamente cortas, ya que los primeros sistemas de observación basados en técnicas instrumentales, que eran sistemas meteorológicos, se iniciaron a mediados del siglo XIX, y las primeras series de observación oceanográficas más sencillas se iniciaron algunas décadas más tarde. Las series de observación que tienen por objetivo la observación de organismos o ecosistemas son aún más recientes, arrancando, las más antiguas, a mediados del siglo pasado. Las grandes variaciones interanuales, sobre todo de tipo climático, no permiten detectar tendencias con validez estadística en series de observaciones de menos de diez años, y con frecuencia se requieren varias décadas para establecer con suficiente

seguridad la dimensión del cambio ambiental. Con esta premisa se estableció primero en 1980 en Estados Unidos de América y luego en diversos países del mundo una red de observaciones ecológicas a largo plazo (redes LTER, del inglés Long Term Ecological Research), que buscan sintetizar y armonizar observaciones e investigaciones ecológicas de un amplio y diverso número de ecosistemas con el fin de predecir su evolución y mejorar nuestra capacidad de gestionarlos y conservarlos (ver enlaces www.lternet.edu para la red americana, y www.ilternet.edu para la red internacional). Esta estructura en red coordinada se está implantando en Europa (www.alter-net.info) y en España (www.redote.org). Los sistemas de observación cumplen dos funciones principales: mejorar nuestra comprensión de fenómenos y procesos ambientales complejos, y servir de sistemas de alerta temprana ante el cambio global, revelando con relativa rapidez y seguridad estadística la existencia de cambios abruptos o inusuales en la evolución temporal de los procesos naturales.

Con una visión similar a las redes LTER pero sin limitarse a sitios o localidades concretas, el Grupo de Observaciones de la Tierra (Group on Earth Observations, GEO, www.earthobservations.org), que reúne 66 países de la Naciones Unidas incluyendo España, promueve un ambicioso plan a diez años vista: la

puesta en práctica de la observación global de la Tierra mediante el establecimiento de un sistema de sistemas de observación que incluyen desde sensores remotos y teledetección hasta estudios ecosistémicos y socioeconómicos del planeta. Esta puesta a punto de un Sistema de Sistemas de Observaciones Globales Terrestres (Global Earth Observation System of Systems, GEOSS) implica el desarrollo de nueve áreas de trabajo entre las que se encuentran desglosadas no sólo la exploración del clima, el funcionamiento de los ecosistemas y la biodiversidad, sino aspectos directamente relacionados con la especie humana como son la salud, la energía, los recursos naturales y la agricultura. GEOSS está previsto que alcance plena operatividad a finales de esta década y supondrá una eficaz herramienta para integrar el conocimiento sobre cambio global y establecer recomendaciones precisas para atenuar sus efectos.

En lo que se refiere a datos climáticos, es de principal importancia el sistema de observación del clima global (GCOS, Global Climate Observing System) establecido en 1992 por acuerdo de la Organización Meteorológica Mundial (WMO), la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (IOC), el programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) y el Consejo Internacional para la Ciencia (ICSU), para asegurar que toda la información relativa

al clima de la Tierra se pueda poner a disposición de todos los interesados. Otros programas relacionados son el de observación del océano global (GOOS) y el del sistema terrestre global (GTOS). Una gran cantidad de información de éstos y otros programas relacionados con el cambio global se puede consultar en la página web del Centro de Información de Sistemas de Observación Global (<http://gosis.org>).

En el océano existen programas de ubicación de boyas que emiten, a través de satélites, datos sobre temperatura, salinidad, corrientes y otras propiedades relevantes para estimar el contenido de calor y circulación del océano. Además, con el fin de obtener en un futuro buenas estimaciones de la captación del CO₂ antropogénico, la comunidad científica internacional ha diseñado una serie de sistemas de muestreo que utilizan buques de oportunidad (buques de líneas comerciales en los que se instala un equipo de medida de CO₂), estaciones fijas, y secciones repetidas distribuidas por todos los océanos (figura 4.15.). Ésta es una iniciativa impulsada por el SCOR-IOC (Scientific Committee on Oceanic Research/Intergovernmental Oceanographic Commission) incluida en el International Ocean Carbon Coordination Programme (IOCCP; <http://ioc.unesco.org/ioccp/>).

Con la misma filosofía de trabajo coordinado bajo un objetivo común se está desarrollando el proyecto

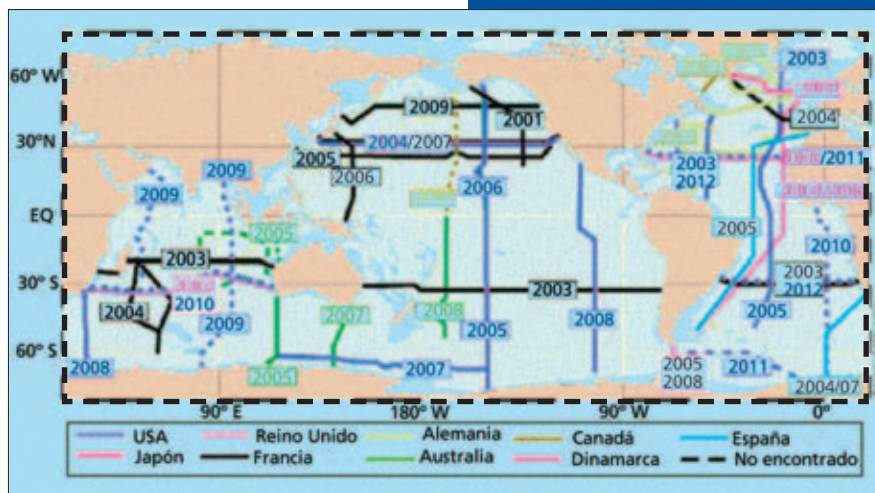
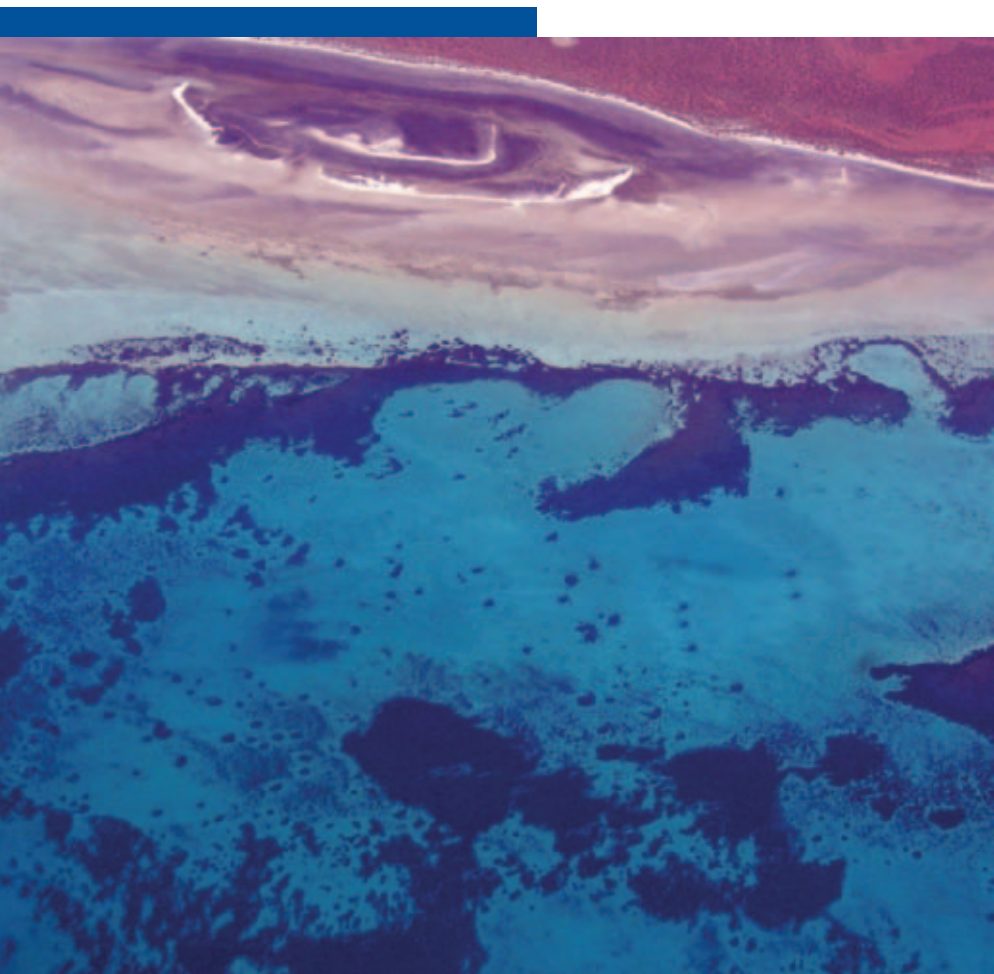


Figura 4.15. Secciones hidrográficas repetidas compiladas en enero 2003 en la reunión del IOCCP celebrada en la sede de UNESCO, París.

CARBOOCEAN del VI Programa Marco de la Unión Europea, en el que están involucrados 44 grupos de investigación, entre ellos varios españoles. El objetivo es evaluar con precisión las fuentes y sumideros del carbono marino en los océanos Atlántico y Circumpolar Antártico.

Observación desde el espacio

Sin lugar a dudas, la herramienta que ha dado un empuje definitivo a la ciencia y observación del cambio global es la teledetección desde satélites orbitales. Gracias a estos vehículos espaciales que portan espectroradiómetros, escaterómetros o sensores de microondas, ahora es posible obtener, en periodos de tiempo impensadamente cortos, registros globales cuasi-sinópticos de variables tan



Vista aérea de la línea de costa en Shark Bay (Australia Occidental).

Fotografía: Susana Agustí.

disparaes como la temperatura y el nivel del mar, la velocidad del viento, la cobertura de hielo y nieve, de nubes y de partículas atmosféricas, la cantidad de radiación reflejada, la extensión y concentración de pigmentos fotosintéticos, e incluso la emisión

de algunos gases a la atmósfera. Sólo de esta forma podemos percibir las dinámicas interrelacionadas de la biosfera, las grandes corrientes marinas, los hielos polares y la atmósfera a escala planetaria, es decir, lo que se viene a llamar el estado del sistema Tierra. El primer satélite meteorológico, el satélite estadounidense TIROS-1 se lanzó, como se ha indicado anteriormente, en 1960.

En la actualidad, varias agencias espaciales, en especial la de Estados Unidos, la europea y la japonesa, ponen a disposición de la comunidad científica buena parte de los datos de observación obtenidos por los satélites. A su vez, la comunidad científica ofrece a las agencias conocimiento para la mejora de los sensores de observación y para la conversión de las mediciones en datos de interés ambiental. Para hacerse una buena idea de la capacidad de observación que ofrecen los satélites, recomendamos las páginas web de la NASA <http://earthobservatory.nasa.gov> y de la Agencia Europea del Espacio, www.esa.int/esaEO/index.html.

Todos estos sistemas de observación han generado una base para evaluar los cambios que se están dando en el funcionamiento del sistema Tierra en el Antropoceno y que representan un conjunto de huellas del cambio global (cuadro 4.1.), que conforman un conjunto de evidencias claras sobre el impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra.

Cuadro 4.2.

Algunas huellas de cambio global

En la composición atmosférica

- CO₂: 280 ppm (año 1750) - 386 ppm (2009)
- CH₄: 0.7 ppm (año 1750) - 1.78 ppm (2009)
- N₂O: 0.27 ppm (año 1750) - 0.32 ppm (2009)

En el clima

- Temperatura media global en superficie: aumento de $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ durante el siglo XX; el año 2005 ha sido el de temperatura global más cálida registrada hasta la fecha.
- Temperatura en el Hemisferio Norte: las décadas 1990-2009 fueron las más cálidas de todo el milenio. La media de los primeros cinco años del siglo XXI han superado la temperatura media de la década anterior.
- Amplitud térmica diaria: disminución entre 1950 y 2000.
- Episodios de calor extremo: aumento.
- Episodios de frío extremo: disminución.
- Precipitación en las zonas continentales: aumento de un 5-10% en el Hemisferio Norte. En algunas regiones, disminución (Mediterráneo).
- Episodios de precipitación muy abundante: aumento en latitudes medias y altas.
- Sequías: periodos más largos sin lluvia.
- Aumento del número de huracanes de alta energía en el Atlántico.

En el océano

- Nivel del mar: aumento medio global de 10-25 cm en los últimos 100 años.
- Temperatura del océano: aumento medio de $0,31^{\circ}\text{C}$ hasta 300 m de profundidad en los últimos 50 años, con aumentos superiores ($> 11^{\circ}\text{C}$) en el Mediterráneo, donde se ha alcanzado un máximo (30°C) en el verano de 2006.
- Hielo ártico: disminución de la extensión en verano en un 8% por década desde finales de los 70, con tendencia a la aceleración. La extensión

del hielo en el mes de septiembre alcanzó un mínimo histórico en el año 2007.

- Aumento de CO₂ y acidificación del océano: más de dos décimas de pH de disminución en el agua superficial del océano global.
- Centenares de nuevos compuestos de origen sintético hallados en las zonas oceánicas más aisladas y los fondos más profundos.

En los ecosistemas

- Deterioro generalizado de la calidad del agua por lluvia ácida, eutrofización (aportes excesivos de nitrógeno y fósforo) y aportes de contaminantes.
- Ritmos estacionales de las especies (fenología): alteración.
- Migración: modificación de las fechas de salida y llegada.
- Extinción de especies: más de 800 especies extintas en los últimos siglos. Las tasas de extinción actuales son más de 1.000 veces superiores a las tasas anteriores al impacto humano.
- Depauperación de los stocks pesqueros en el océano.
- Pérdida de hábitats: disminución anual de un 0,5% de los bosques tropicales, 4-9% de los arrecifes de coral; 1-2% de los bosques de manglar y marismas; 2-5% de las praderas submarinas.
- Productividad de los ecosistemas: generalmente disminución (excepto en zonas eutrofizadas).
- Hypoxia: aumento de los episodios de mortalidad por hypoxia (niveles bajos de oxígeno) en ecosistemas costeros.
- Capacidad de tolerancia de las perturbaciones (resiliencia) de los ecosistemas: disminución.
- Cambios no lineales tales como: expansión epidémica de enfermedades contagiosas, proliferación de algas y muerte de peces, colapso de

poblaciones de peces con repercusión directa en pesquerías, extinciones locales y expansión de especies exóticas invasoras, cambios rápidos en las especies dominantes en los ecosistemas, cambio climático regional en relación con cambios en la vegetación (ciclos de interacción complejos).

- Bienes y servicios que aportan los ecosistemas: alteración.

En la sociedad

- Salud: aumento de mortalidad asociada a olas de calor y a otros eventos climáticos extremos (huracanes, inundaciones, riadas, etc.). Aumento de mortalidad y problemas de salud causado por el uso de agua insalubre. Desplazamiento de los rangos geográficos de patógenos. Aumento de alergias, enfermedades respiratorias y distintos tipos de cáncer fomentados por contaminantes.
- Aumento de incidencia de quemaduras solares, cataratas y de cáncer de piel por aumento de la radiación ultravioleta.
- Bienes: aumento de daños causados por eventos extremos (inundaciones, tsunamis, huracanes, etc.).
- Agua: aumento de la población que no tiene acceso a agua de calidad y en cantidad suficiente para satisfacer sus necesidades.
- Migración: aumento de flujos migratorios causados por deterioro ambiental y catástrofes en las regiones emisoras.
- Economía: aumento de pérdidas por bienes asegurados y daños a las infraestructuras debido a eventos climáticos extremos. Pérdida de productividad agrícola por desertificación y eventos extremos (sequías, tormentas, etc.). Oscilaciones en flujos turísticos asociados a cambios climáticos.



Extracción artesanal de sal marina en la isla de La Palma.

Fotografía: F. Valladares.

4.8. La erosión de la capa de ozono

La radiación ultravioleta y la capa de ozono terrestre

Hace más de 3.000 millones de años, las cianobacterias que poblaban los océanos cambiaron la composición de la atmósfera, al producir oxígeno mediante la fotosíntesis que se fue acumulando en la atmósfera y que al alcanzar la estratosfera se transformó en ozono. Así se explica actualmente el origen de la capa de ozono atmosférica que, dada la capacidad de este gas para absorber la radiación ultravioleta, permitió el desarrollo de la vida sobre la superficie del planeta Tierra.

El oxígeno liberado a la atmósfera una vez en la estratosfera está expuesto a la alta radiación solar cuya radiación ultravioleta desnaturaliza la molécula de oxígeno (O_2) en átomos de oxígeno (O), y los átomos de oxígeno reaccionan a su vez con moléculas de oxígeno formando ozono (O_3). La misma radiación ultravioleta disocia el ozono en átomos de oxígeno, que pueden volver a interactuar para formar oxígeno molecular y ozono, de modo que la formación del ozono en la estratosfera es un proceso dinámico. Este proceso se resume en una serie de ecuaciones, conocidas como ecuaciones de Chapman, que explican los fenómenos que ocurren en la estratosfera relativos a la formación y disociación de ozono y de moléculas y átomos de oxígeno. La concentración de ozono en la estratosfera muestra su máxima concentración a unos 20 km de altitud, disminuyendo hasta casi desaparecer en la troposfera.

Esta capa de ozono sigue protegiendo en la actualidad la superficie de los continentes y de los océanos de este planeta de la alta radiación ultravioleta que se recibe sobre la atmósfera. El ozono absorbe la banda de la radiación solar del ultravioleta B y C que incluye longitudes con alta energía de entre 280 y 320 nanómetros. De no ser por el ozono, la radiación ultravioleta B traspasaría la atmósfera y resultaría dañina para los organismos vivos. La extensión de la capa de ozono, su grosor

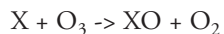
Cormorán junto al faro
de Cap Salines, Mallorca.
Fotografía: C. M. Duarte.



y su dinámica estacional (Solomon, 1999; Staehelin *et al.*, 2001) constituyen uno de los temas de estudio para los químicos atmosféricos, quienes vienen realizando mediciones regulares en la atmósfera sobre distintos lugares del planeta, entre ellos la Antártida, el océano Glacial Ártico o la estación de la localidad suiza de Arosa, en la que se efectúan controles regulares de ozono desde 1926, y que representa la serie temporal de medidas de ozono más antigua.

Contaminación atmosférica y declive del ozono

Las ecuaciones de formación y destrucción del ozono descritas por S. Chapman en 1930 incluían exclusivamente el oxígeno y la radiación ultravioleta (Solomon, 1999; Dahlback, 2002). Pero después del trabajo de Chapman se fueron describiendo otras sustancias gaseosas, presentes de forma natural en la atmósfera, que actuaban combinándose con el ozono (O₃) disociándolo:




donde X puede ser H, NO, OH, Cl, I y Br. La presencia natural de estos compuestos en la atmósfera y su papel en la destrucción del ozono ayudaron a explicar que los niveles de ozono fueran más bajos de lo que se predecía únicamente como resultado de las reacciones del oxígeno y la radiación ultravioleta descritas por Chapman.

En 1970, el profesor P. Crutzen describió las reacciones de disociación del ozono en las que interviene el nitrógeno, en concreto el NO. Además, Crutzen puso de manifiesto un problema: que las emisiones de óxido nítrico, un gas estable de larga vida producido por las bacterias del suelo, habían aumentado a raíz del uso de fertilizantes y podían dar lugar a un aumento del NO en la estratosfera, lo que conduciría a una reducción del ozono. De esta forma Crutzen fue el primero en identificar la actividad humana como un factor que podía alterar la composición atmosférica resultando en destrucción de ozono. Posteriormente Crutzen, y de

manera independiente, H. Johnston identificaron que los vuelos de los aviones supersónicos contribuían también a las emisiones de NO. En 1974, Rowland y Molina describieron el papel del Cl atmosférico en la disociación del O₃ estratosférico. Además indicaron que las emisiones de compuestos orgánicos halógenos del cloro (gases de larga vida, como los CFC utilizados en sistemas de refrigeración) podrían estar disminuyendo la concentración de ozono estratosférico. Al alcanzar la estratosfera, los CFC son disociados por la radiación UV, formándose Cl libre,

Iceberg esculpido por la acción de las olas
en el mar de Weddell, Antártida.
Fotografía: C. M. Duarte.





que reacciona con el ozono, destruyéndolo. La teoría de Rowland-Molina fue muy discutida por la industria de aerosoles y halocarburos, que la calificó de “ciencia ficción”. Sin embargo, otros investigadores añadieron pruebas de laboratorio y medidas de radicales de cloro en la atmósfera que apoyaban dicha teoría, relacionando los CFC con el deterioro del ozono. Las predicciones no eran muy optimistas: si continuaban las emisiones de CFC, la capa de ozono podría reducirse al 30-50% para el año 2050.

En los años ochenta, los científicos que estudiaban la capa de ozono en la estación británica de Halley, en la Antártida, constataron que la concentración de ozono disminuía; el descenso que midieron fue tan elevado, que pensaron que no podía deberse a una reducción real, sino a un fallo en las sondas. En 1985, la revista *Nature* publicó el descubrimiento, por parte de Farman, Gardiner y Shanklin, del “agujero” de ozono antártico, llamado así por la enorme bajada detectada en la concentración de ozono estratosférico. Este descubrimiento supuso la confirmación de las teorías y predicciones de Crutzen, Molina y Rowlan, y supuso un aldabonazo para la comunidad científica, por las consecuencias que puede tener para la vida la pérdida de la capa de ozono.

El descenso en los valores de ozono no sólo se observó en la Antártida

(Dahlback, 2002). La serie temporal de mediciones de la capa de ozono realizadas sobre Arosa (Suiza), que registra medidas desde el año 1926, mostraba a su vez una caída inequívoca en la concentración de ozono a partir de 1980, que ha seguido disminuyendo a una tasa aproximada de 2,9% por década. El deterioro de la capa de ozono era, por tanto, una realidad global y la conclusión fue que la ozonósfera se estaba deteriorando. La reacción fue contundente y mediante el tratado conocido como Protocolo de Montreal, firmado en 1987, los distintos gobiernos acordaron reducir las emisiones de CFC, enormemente restringidas desde entonces. Crutzen, Molina y Rowland ganaron el premio Nobel de Química en 1995 por su trabajo sobre el ozono estratosférico.

La situación actual: las predicciones y el calentamiento global

Tras el Protocolo de Montreal se consiguió detener el declive en la concentración de ozono estratosférico. Sin embargo, todavía no se han recuperado los niveles de este gas existentes en la estratosfera antes de comenzar dicho declive en los años setenta. Las predicciones actuales están basadas en el ritmo al que desaparecen los CFC de la atmósfera ya que son gases de larga vida. Se espera que los niveles de ozono existentes en la

estratosfera de los años sesenta o setenta no se recuperarán antes de 2050 (Weatherhead y Andersen, 2006) debido a que los CFCs permanecerán en la atmósfera hasta entonces. Sin embargo estas predicciones se han cuestionado recientemente (Weatherhead y Andersen, 2006) por considerarse que existe una gran incertidumbre, debida, por un lado, a que se siguen emitiendo a la atmósfera sustancias contaminantes susceptibles de destruir el ozono —como el óxido nitroso y otros compuestos nuevos que van apareciendo cada año para distintos usos— y, por otro lado, al hecho de que el calentamiento global generado por la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera también puede estar influyendo sobre la falta de recuperación del ozono. El calentamiento de las capas bajas de la atmósfera tiene un efecto adverso sobre la capa de ozono, ya que la temperatura de la troposfera influye sobre la de la estratosfera: cuanto más calor se acumula en la troposfera, más se enfría la estratosfera; y cuanto más fría es la estratosfera, más ozono se pierde en esta capa (Shindell, Rind y Lonergan, 1998). Como resultado de todo ello, en las áreas polares y en latitudes intermedias, especialmente del Hemisferio Sur, no se ha recuperado la concentración de ozono, que muestra valores inferiores a los existentes antes de las emisiones de CFC.

Un agujero de ozono sobre la Antártida

En las áreas polares, la concentración de ozono sufre una gran variación debido a la variación estacional en la radiación solar. El declive del ozono y la magnitud del agujero de ozono son mayores sobre la Antártida que sobre el Ártico. Esto se debe a que la concentración natural de este gas tiende a ser más baja sobre la Antártida que sobre el Ártico como consecuencia de las diferencias topográficas. El Ártico es un océano helado rodeado de continentes, mientras que la Antártida es un continente helado rodeado de océano. Esto tiene una gran importancia en la circulación atmosférica —incluida la de la estratosfera— que se genera sobre los dos polos. Al llegar el invierno, la falta de radiación solar en los polos provoca una disminución en la dinámica de producción-destrucción del ozono, cuya concentración puede entonces verse influida por la circulación de las masas atmosféricas. La falta de radiación solar da lugar a un enfriamiento del aire en los polos, de modo que se produce un fuerte gradiente de temperatura que origina una enérgica circulación del aire en dirección este-oeste, que circunda las áreas atmosféricas polares. Este torbellino, conocido como vórtex, impide que el aire rico en ozono de latitudes inferiores penetre en el interior, aislando la atmósfera sobre los polos.

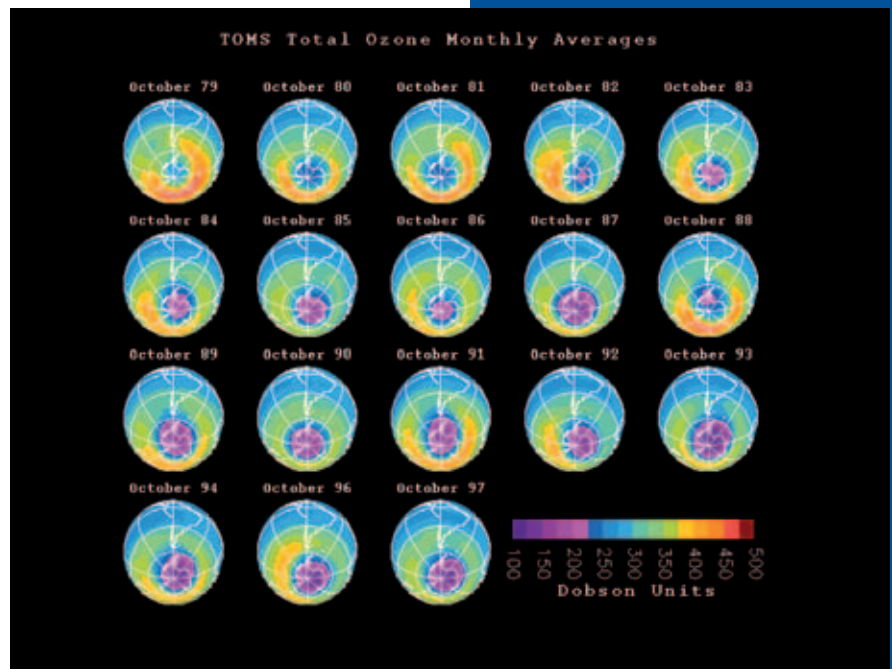
Pero mientras que el vórtex es muy fuerte sobre la Antártida, no lo es tanto sobre el océano Glacial Ártico, donde sufre frecuentes perturbaciones que permiten la penetración de aire rico en ozono procedente de latitudes inferiores. Por ello, aunque la concentración de ozono ha disminuido sobre el Ártico, no siempre se desarrolla un agujero de ozono sobre esta zona. Por el contrario, el agujero de ozono sobre la Antártida es persistente en la actualidad, con un mínimo en los valores de ozono en octubre, coincidiendo con la primavera austral. El agujero de ozono antártico mostró su dimensión máxima en octubre de 2006, según indican los registros realizados desde los años ochenta, época en la que no existía (figura 4.16), y además se detectó un mínimo de concentración con respecto a los valores observados en los años anteriores, lo que ha constatado que sigue sin haber signos de recuperación de la capa de ozono.

Daños inducidos por el aumento de la radiación UV

La radiación ultravioleta B (RUVB) contiene una gran energía por lo que resulta dañina para la vida. Es radiación electromagnética que causa daño a nivel molecular en los organismos, por lo que tiene un efecto directo sobre moléculas fundamentales para la vida,

desnaturalizándolas, como es el caso de las proteínas, los lípidos, los pigmentos fotosintéticos, y el ADN. La importancia del ADN para el funcionamiento celular y la herencia genética hace que los efectos sobre esta molécula sean especialmente importantes; el daño más común de la radiación UVB sobre el ADN es la alteración de las bases o sus enlaces, impidiendo la replicación del ADN, pero además tiene efectos más persistentes de tipo mutagénico, y puede ser, por tanto, cancerígena. La RUVB también produce la alteración molecular de un gran número de sustancias no vitales pero comunes en el medio ambiente, lo que tiene también efectos dañinos indirectos sobre los organismos, como son, por ejemplo, el aumento de la toxicidad de algunos contaminantes o la producción de sustancias reactivas del oxígeno [ej. H_2O_2 (agua oxigenada) o $HO\cdot$ (radical hidroxilo)], compuestos que son muy reactivos, altamente oxidantes y por tanto tóxicos para los organismos ya que inducen estrés oxidativo en las células, que es una de las causas más importantes de la mortalidad celular.

El aumento de la radiación UVB debido a la reducción de la concentración de ozono estratosférico tiene, por tanto, un efecto negativo sobre los animales y las plantas, sobre los ecosistemas terrestres y acuáticos, y sobre la población humana. Los efectos del aumento de la



RUVB son sujeto de estudio en la actualidad y son de gran complejidad ya que implica diversos niveles de organización biológica en los organismos, así como también distintos niveles de organización en los ecosistemas. Sus consecuencias a nivel global todavía no se han cuantificado.

Problemas en la población humana

La exposición a la radiación ultravioleta induce en la especie humana una serie de daños sobre la piel, los ojos y el sistema inmunitario que están muy

Figura 4.16. El agujero de ozono sobre la Antártida queda bien reflejado en los mapas de distribución de la concentración de ozono (medida en unidades Dobson) construidos a partir de los datos del satélite TOMS de la NASA. En el mes de octubre se detecta sobre la Antártida la concentración de ozono mínima, que ha ido descendiendo notablemente desde 1984.

Fuente: NASA.



Aguas carbonatadas y limpias del Tajo en su curso alto antes de pasar por pueblos importantes y recibir aportes de arroyos contaminados.

Fotografía: F. Valladares.

bien documentados en la actualidad (World Health Organization, 2002).

La quemadura solar, o eritema, es el daño más común de entre los inducidos en la piel humana. La exposición a la radiación UV también aumenta el envejecimiento de la piel, inducido por el aumento de la oxidación de las células cutáneas expuestas a la RUVB principalmente. La melanina es el pigmento protector producido por la piel humana como respuesta a la exposición a la radiación UV, y aunque representa una ayuda frente a la inducción de los daños cutáneos, no proporciona un grado de protección

completo, por lo que no evita que se produzcan daños sobre la piel humana. Por esta razón, las organizaciones mundiales de salud recomiendan evitar periodos largos de exposición al sol, así como el uso de protectores solares. Otro daño cutáneo derivado de la exposición a la RUV es el cáncer de piel, que implica mayor gravedad y que incluye el melanoma celular basal y el melanoma celular escamoso, aunque generalmente estos tipos de cáncer no suelen ser mortales tratándose bien con cirugía y otros tratamientos químicos. Aunque es un tema que implica dificultades, su relación con la

exposición a la radiación UV solar está bastante probada. Entre los años 60 y 80, los gobiernos canadiense, australiano y estadounidense detectaron un aumento de más del doble en la incidencia de estos tipos de cáncer en sus poblaciones. También, su incidencia es mayor en las zonas del cuerpo que están normalmente expuestas a la radiación solar. En algunos países, también se ha podido probar que su incidencia aumenta en las poblaciones que viven en áreas que reciben mayores dosis de radiación UV (e.g. en las áreas más tropicales de su territorio). Otro tipo de cáncer, el melanoma, de mayor malignidad, también está relacionado con la exposición solar, aunque en este caso su incidencia está más relacionada con un historial de quemaduras solares, que no tanto de exposición.

El tipo de piel tiene una gran importancia en la sensibilidad a la radiación UV, de forma que las personas rubias y de piel blanca son más sensibles que las de piel oscura, siendo los pelirrojos el tipo de piel que

muestra una mayor sensibilidad. Sin embargo, otros daños inducidos por la RUV, como los daños oculares y los ocasionados en el sistema inmunitario son independientes del tipo de piel, lo que debe tenerse en cuenta ya que implica que también las personas de piel pigmentada y oscura deban protegerse de la RUV.

Los daños oculares derivados de la exposición a la RUV implican conjuntivitis y queratitis que son en realidad quemaduras solares de la fina piel cutánea ocular. Las cataratas son la causa más importante de la ceguera en el mundo, y aunque se pueden desarrollar con el aumento de la edad, la exposición solar y en particular a la radiación UVB aparece como el mayor factor de riesgo para el desarrollo de las cataratas.

El sistema inmunológico representa nuestro sistema de defensa más importante frente a las infecciones y frente al desarrollo del cáncer, y en este sentido existe evidencia creciente de la inmunodepresión sistemática inducida por la exposición a la RUV. Experimentos con animales han demostrado además que la radiación UV puede modificar el curso y gravedad de los cánceres de piel, disminuye nuestras defensas durante las infecciones y reduce la capacidad preventiva de las vacunas.



En la actualidad se considera que el aumento de la radiación UVB derivado de la pérdida de ozono tiene consecuencias importantes en la salud humana, y que éstas son especialmente numerosas en los países del Hemisferio Sur. Se estima que una disminución del 10% en la concentración de ozono estratosférico se traduciría en un aumento anual adicional de 300.000 casos de cáncer de piel (tipo no-melanoma) y de 45.000 casos más de melanoma maligno, además de un incremento de entre 1,6 a 1,75 millones de casos al año de cataratas en la población humana mundial (World Health Organization, 2002).

Arrecife de coral en Cuba.
Fotografía: A. Fernández Medina.

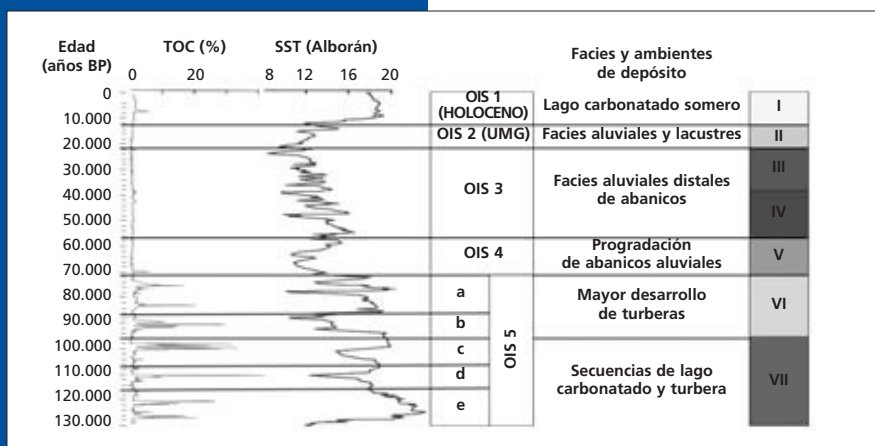


Figura 4.17. El registro de la laguna del Cañizar de Villarquemado (cordillera Ibérica) comparado con la temperatura superficial del mar de Alborán (Cacho *et al.*, 2001. El valor del TOC (carbono orgánico total) refleja el desarrollo de facies de turba en la cuenca de la laguna. Obsérvese la gran variabilidad hidrológica durante el OIS 5 y en particular durante el Eemiense (OIS 5 e) definida por la alternancia de periodos con mayor desarrollo de turberas y otros de lagos carbonatos someros.

4.9. El cambio global en el pasado

El cambio global es tetra-dimensional: no sólo ocurre en una localización geográfica determinada (desde un ecosistema a todo el planeta Tierra) sino que se desarrolla a lo largo del tiempo. Y esa dimensión temporal abarca diferentes escalas, desde millones de años hasta décadas. De ahí la importancia de las series meteorológicas largas, de la monitorización de los ecosistemas y de los documentos históricos que permiten conocer aspectos del clima y de las actividades humanas durante los últimos siglos y milenios. Pero para entender y evaluar el cambio global es preciso disponer de indicadores que informen de la variabilidad del sistema climático y los efectos de las actividades humanas sobre

los ecosistemas a escalas temporales mayores que las de la observación directa, la documentación histórica o los datos arqueológicos. Necesitamos ir más allá de la memoria colectiva humana y esa información nos la proporcionan los registros de cambio global en el pasado. Durante el siglo XIX, el estudio de los sedimentos transportados por los glaciares en Europa y Norteamérica sentó las bases para comprender que la Tierra había sufrido grandes cambios climáticos con alternancia de fases glaciares e interglaciares en el pasado reciente (los últimos dos millones de años, el Cuaternario). Pero ha sido durante la segunda mitad del siglo XX cuando el desarrollo de la Paleoclimatología ha permitido reconstruir los climas del pasado desde escalas milenarias a anuales. La metodología empleada en el estudio de la reconstrucción de los paleoclimas a partir del registro sedimentario (lacustre o marino) es multidisciplinar e integra estudios de tipo biológico (polen, diatomeas, ostrácodos, quironómidos, etc.) con sedimentológicos y geoquímicos.

Numerosos archivos de cambio climático en el pasado están disponibles en la actualidad: sedimentos de los fondos oceánicos y de lagos, anillos de crecimiento de los árboles, corales, espeleotemas, glaciares de montaña y de casquetes de hielo en altas latitudes son los más importantes. En algunos casos

Manatí en Homossasa Springs, Florida.

Fotografía: C. M. Duarte.

es posible reconstruir la temperatura o variables relacionadas con la precipitación, en otros se trata de indicadores indirectos (*proxies*) relacionados con esas variables climáticas. El estudio de estos archivos mediante diversas técnicas biológicas, geoquímicas e isotópicas nos ha llevado a conocer la variabilidad natural del clima durante los periodos glaciares —en los que se han desarrollado grandes masas glaciares particularmente en el Hemisferio Norte— e interglaciares —cuando estas masas se han reducido como en la actualidad— y demostrar que han existido transiciones rápidas a periodos interglaciares frente a los cambios más graduales hacia periodos glaciares. El avance en los métodos de datación absoluta y el estudio de registros de alta resolución (sondeos de hielos antárticos y de Groenlandia, por ejemplo) han confirmado que la dinámica del sistema climático incluye periodos de cambios abruptos, en ocasiones a escala de generaciones humanas. El conocimiento de la respuesta del sistema Tierra o de

alguno de sus ecosistemas a los cambios climáticos y globales del pasado es esencial también para validar los modelos físico-matemáticos con los que “predecimos” el cambio climático futuro. En el caso de la Península Ibérica, los modelos de circulación atmosférica existentes tienen dificultades para reproducir las condiciones de humedad en el pasado durante algunos periodos como el Holoceno Medio o la deglaciación que conocemos a partir del estudio de los paleoregistros. Dado que no podemos realizar experimentos con el planeta a largo plazo, la capacidad de los modelos para reproducir los climas del pasado es una garantía de su capacidad predictiva para el futuro. Podemos comparar, por ejemplo, la duración y estructura del actual periodo interglacial en el que vivimos (el Holoceno) con el último interglacial (el Eemiense hace unos 130.000 años) (figura 4.17) o con el último en el que la configuración orbital de la Tierra era similar a la actual (el estadio isotópico marino 11).



El registro del cambio climático en el pasado en la Península Ibérica

La ubicación de la PI entre las zonas de clima templado y subtropical, en el límite sur de los frentes atlánticos, así como su compleja geografía y su situación entre el Atlántico y el Mediterráneo, explica la variabilidad climática actual marcada por amplios gradientes de precipitación y temperatura (Rodríguez-Puebla *et al.*, 1998). La mayor parte de las precipitaciones están relacionadas con los frentes atlánticos aunque los



Playa de Es Cargol, sureste de Mallorca.

Fotografía: C. M. Duarte.

sistemas convectivos de mesoescala producen precipitaciones importantes en las regiones mediterráneas especialmente en verano y otoño (García-Herrera *et al.*, 2005).

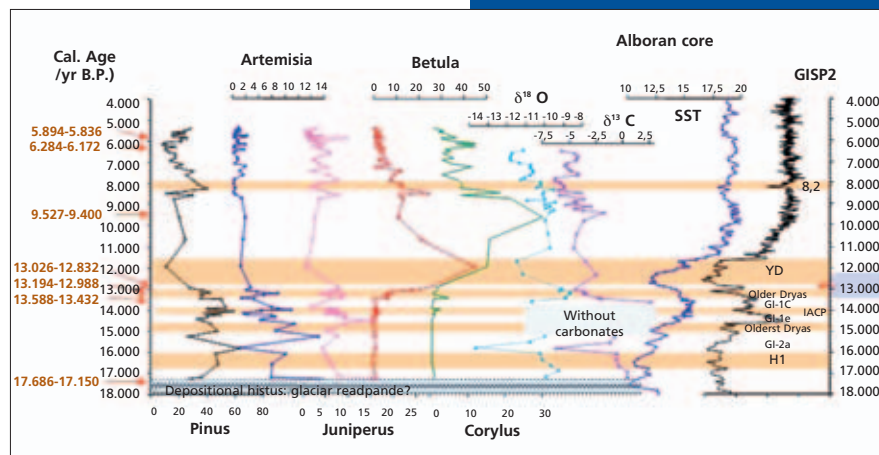
Modificaciones importantes en los patrones de circulación como consecuencia de cambios globales de naturaleza muy diferente (cambios en la configuración orbital, de los glaciares o variaciones en la insolación) podrían dar lugar a condiciones de mayor humedad en la PI (Harrison *et al.*, 1992; Kutzbach *et al.*, 1993). Entre

estas modificaciones posibles, se encuentran: 1) un desplazamiento hacia el sur de los vientos del oeste o *westerlies*, como ocurre, por ejemplo durante periodos glaciares, que daría lugar a un incremento de las precipitaciones invernales; 2) un avance hacia el norte del monzón africano durante intervalos de mayor insolación estival que la actual, con un debilitamiento de la influencia de la circulación subtropical sobre el Mediterráneo; 3) un fenómeno local de tipo monzón, generado por la

relativamente extensa masa continental de la Península Ibérica que favorece el desarrollo de depresiones sobre el Mediterráneo e incrementa las precipitaciones y tormentas de tipo ciclónico en verano.

En la Península Ibérica son pocos los registros continentales que abarcan más de un ciclo glacial (por ejemplo, Padul, Fuentillejo, Villarquemado). Entre ellos, el sondeo de 72 m en la laguna del Cañizar de Villarquemado (Teruel) permite reconstruir la evolución paleohidrológica regional durante los últimos 130.000 años e indica que el último máximo glacial global (en torno a los 20.000 años AP) no fue el periodo más árido en la Península Ibérica, y que durante el Eemiense, con un clima más húmedo y cálido similar al del Holoceno, también se produjeron numerosas fluctuaciones climáticas (figura 4.17). Hemos de esperar, por lo tanto, en periodos interglaciares como el que vivimos en la actualidad, cambios climáticos rápidos y afecciones importantes al ciclo hidrológico en regiones mediterráneas.

Las fluctuaciones climáticas principales en la Península Ibérica desde el Último Máximo Glaciar se han reconstruido a escala de milenios (Pérez Obiol & Juliá, 1994; Sánchez Goñi & Hannon, 1999; Bárcena *et al.*, 2001; Cacho *et al.*, 2001, Martínez-Ruiz *et al.*, 2003; González-Sampérez *et al.*, 2006). Numerosos grupos de investigación estudian los registros marinos de las regiones oceánicas que rodean a la Península Ibérica (González-Donoso *et al.*, 2000; Bárcena *et al.*, 2001; Cacho *et al.*, 1999, 2001; Moreno *et al.*, 2002, Martínez-Ruiz *et al.*, 2003). Los estudios polínicos recogen cambios en la vegetación que afectan tanto a los taxones arbóreos como a los estépicos a escala de décadas (Sánchez Goñi *et al.*, 2002) y una respuesta muy rápida de la vegetación a cambios rápidos del clima (González Sampérez *et al.*, 2006). Si bien los estudios del polen son aún dominantes en los análisis del registro terrestre, son cada vez más numerosas las investigaciones basadas en la combinación de diversos indicadores (Giralt *et al.*, 1999; Ruiz-Zapata *et al.*, 2002; González-Sampérez *et al.*, 2006). Las diferentes reconstrucciones muestran que el sistema climático ha experimentado cambios muy rápidos a escalas tanto de décadas como de cientos de años, tanto durante el periodo glacial (ciclos Dansgaard-Oeschger; Dansgaard *et al.*,



1993; Hemming, 2004) como interglaciar (Bond *et al.*, 1997), principalmente relacionados con cambios en la intensidad de la circulación termohalina del Atlántico norte (figura 4.18). La Península Ibérica se ha mostrado especialmente vulnerable a los cambios climáticos pasados debido a su situación y características geográficas por lo que resulta una región excelente para el estudio de los cambios abruptos del pasado. Las variaciones en la temperatura de la superficie del mar (SST) durante estos cambios rápidos y abruptos en el Mediterráneo occidental han sido de hasta 6°C en el último periodo glacial (Cacho *et al.*, 1999), e incluso mayores durante el último interglaciar (Martrat *et al.*, 2004). En el margen portugués, el mar de Alborán y el Mediterráneo occidental se han

Figura 4.18. Los cambios abruptos durante la deglaciación en el Pirineo (El Portalet, alto valle del Gállego) marcados por un aumento de *Juniperus* y la sedimentación de barros grises son sincrónicos a los registrados en el Atlántico norte.

Fuente: González Sampérez *et al.*, 2006.

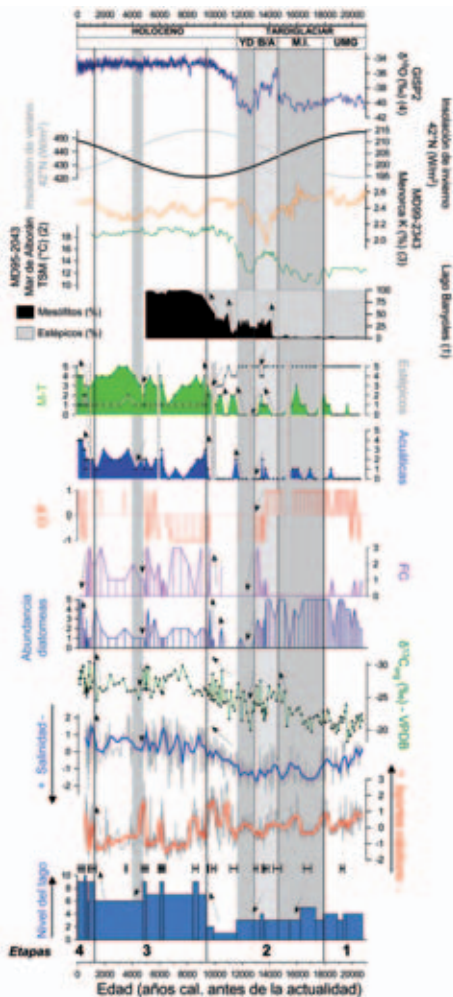
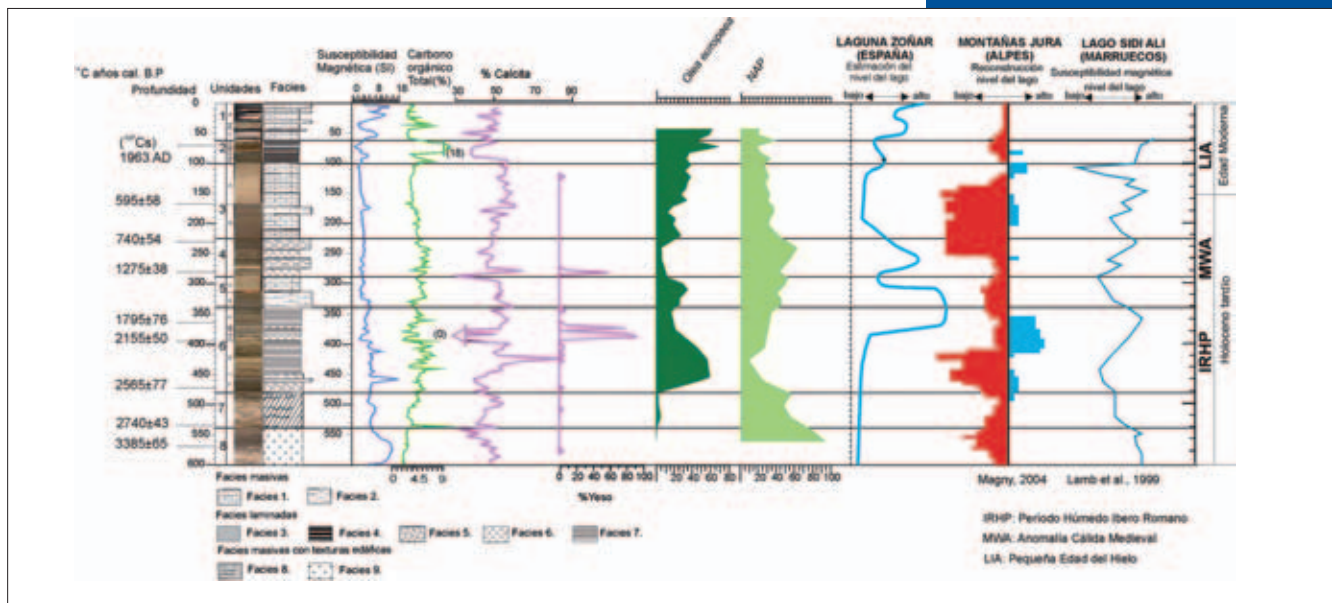


Figura 4.19. Reconstrucción de los cambios en el nivel del Lago de Estanya para los últimos 21.000 años de calendario comparada con otros registros paleoclimáticos regionales y globales (Morellón *et al.*, enviado). De abajo hacia arriba: reconstrucción de las variaciones en el nivel del lago a partir de las facies sedimentarias (bandas verticales, de 0 (mínimo) a 10 (máximo)); dataciones 14C AMS (años calendario antes de la actualidad) (con barras de error), utilizadas para el modelo cronológico; indicadores geoquímicos “aportes detríticos” y “salinidad” (los datos originales están representados en las líneas grises, y los suavizados (media móvil de periodo = 10) están representados con las líneas gruesas roja y azul, respectivamente); abundancia total de diatomeas, fragmentos de *Campylodiscus* (FC) y ratio diatomeas centrales respecto a pennales (C:P); concentraciones polínicas de plantas acuáticas, mesotermófilas (M-T) (región verde) y estépicas (línea gris oscura); abundancia polínica de mesófitas y estépicas en el registro del lago de Banyotes (Girona) (Pérez-Obiol and Julià, 1994); registro de Temperaturas de la Superficie del Mar (TSM, °C) en el mar de Alborán analizadas en el sondeo MD95-2043 (Cacho *et al.*, 2001); contenido en potasio (K, %) en la costa de Menorca analizadas en el sondeo MD99-2343 (Frigola *et al.*, 2008); reconstrucción de la insolación de verano (gris) e invierno (negro) a 42°N (in W/m²); y registro isotópico $\delta^{18}O$ del sondeo GISP2 de Groenlandia (Grootes and Stuiver, 1997). Las líneas discontinuas verticales representan la división en las cuatro etapas principales en la evolución hidrológica y ambiental del lago de Estanya, y las bandas verticales grises, eventos climáticos globales registrados en el Atlántico norte y en Groenlandia (ver parte superior, de izquierda a derecha: Younger Dryas (YD), Bölling/Allerød (B/A) y Mystery Interval (MI)).

documentado los ciclos de Dansgaard-Oeschger y los eventos de Heinrich (Cacho *et al.*, 1999; Martrat *et al.*, 2004; Moreno *et al.*, 2005; Pérez-Folgado *et al.*, 2004) y en el Pirineo (González-Sampérez *et al.*, 2006). Los sondeos de sedimentos de fondos marinos contienen información sobre procesos activos sobre el continente, por ejemplo, polen transportado por los ríos que informa de la vegetación terrestre (Sánchez-Goñi *et al.*, 2002) o polvo de origen eólico que refleja la intensidad de los vientos y disponibilidad de material en zonas áridas (Moreno *et al.*, 2002).

Sin embargo, aunque la influencia del clima del Atlántico norte desde el Último Máximo Glaciar se ha documentado tanto en registros marinos como terrestres, el ritmo y naturaleza de los eventos climáticos principales en la región mediterránea de la PI también muestra una conexión clara con el norte de África (Valero-Garcés *et al.*, 1998; Gasse, 2000). El registro de Estanya (figura 4.19) demuestra la gran variabilidad hidrológica de los sistemas acuáticos mediterráneos durante los últimos 20.000 años y la respuesta rápida de los mismos a los cambios climáticos. El carácter abrupto del comienzo y el final de los cambios hidrológicos se cree que está ligado a la superación de un umbral crítico en los mecanismos de retroalimentación entre el ciclo hidrológico y la vegetación (Gasse, 2000; Hu y Neelin, 2005).



Se considera que el Holoceno es un periodo climáticamente estable, sin embargo, ahora sabemos que durante los últimos 11,000 años se han producido también oscilaciones rápidas (Mayewski *et al.*, 2004; Duplessy *et al.*, 2005). Los cambios climáticos holocenos en la Península Ibérica han tenido un mayor impacto en el balance hídrico que en la temperatura (Cheddadi *et al.*, 1997; Morellón *et al.*, 2008; figura 3). Por otra parte, desde el Neolítico, los cambios en los ecosistemas vegetales han podido tener una gran componente antrópica, mientras que los cambios hidrológicos producidos por las actividades humanas se restringen a los últimos siglos

(Valero-Garcés *et al.*, 2000). Por ejemplo, la reconstrucción paleohidrológica de la Laguna de Zoñar basada en indicadores sedimentarios, geoquímicos y biológicos, presenta cuatro episodios principales, dos secos y dos húmedos (figura 4.20) (Martín-Puertas *et al.*, 2008). Los episodios más secos ocurrieron durante el periodo 4000-2900 años cal. BP, que es sincrónico con una fase árida registrada en Europa, África y la región mediterránea y otro durante el periodo 1300-600 años cal. BP/ 650-1350 d.C., coincidiendo con el Periodo Cálido Medieval. Los episodios húmedos acaecieron uno durante el periodo 2600-1600 años cal. BP, relacionado con

Figura 4.20. El registro de la laguna de Zoñar refleja la alternancia de periodos húmedos (facies laminadas) y áridos (facies masivas) durante los últimos 4.000 años y los cambios en los usos del suelo (modificado de Martín-Puertas *et al.*, 2008). El periodo ibero-romano es el más húmedo y presenta un gran desarrollo de Olea. Las fases hidrológicas son sincrónicas a otros registros europeos y norteafricanos.



Midiendo crecimiento e hidrología en el bosque lluvioso de la estación biológica Senda Darwin (Chiloe, Chile).

Fotografías: F. Valladares.

un evento frío en Europa alrededor de 2800 años cal. BP asociado a un descenso de la insolación; y otro durante los siglos XVII y XVIII, coincidiendo con la Pequeña Edad del Hielo. Otros registros lacustres muestran también una gran variabilidad hidrológica durante el último milenio (Sanabria, Luque y Julia, 2002; Taravilla, Moreno *et al.*, 2008) que puede estar relacionada con el último ciclo de Bond que incluye la Pequeña Edad del Hielo

y el Periodo Cálido Medieval (Bond *et al.*, 1997).

Cambio global y sociedades del pasado

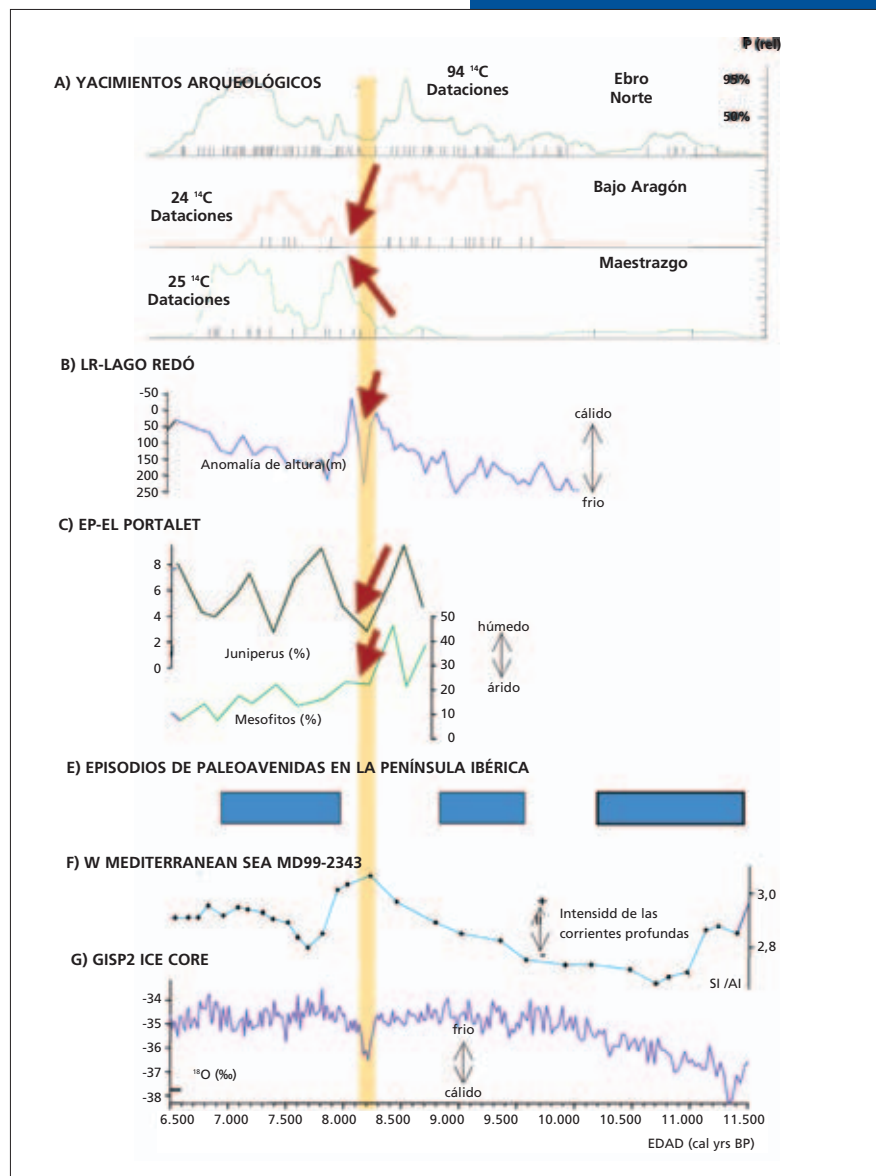
Otro aspecto importante de los archivos de cambio global es que nos permiten conocer cuál ha sido el impacto de las sociedades antiguas sobre los ecosistemas y cuál ha sido la respuesta de estas sociedades a los cambios del pasado. En particular, los cambios en la disponibilidad de agua han sido uno de

los factores esenciales en el desarrollo de las civilizaciones. Los registros de cambio global contienen numerosos ejemplos de esta interacción entre clima, ecosistemas y civilizaciones. Por ejemplo, en sondeos marinos en la Península Arábiga se ha encontrado un nivel con mayor contenido en partículas de origen eólico que se ha relacionado con un periodo seco de unos 300 años de duración que habría tenido un papel desencadenante en el colapso del imperio Acadio (Cullen *et al.*, 2000). Durante el periodo húmedo africano entre los 9000 y los 6000 años AP extensos lagos y vegetación ocuparon áreas del norte del Sahara y Sahel lo que produjo un descenso de los sedimentos de origen eólico de procedencia sahariana que se observa claramente en los sondeos del Atlántico (de Menocal *et al.*, 2000). El final de este periodo húmedo fue relativamente rápido, aunque la respuesta de los ecosistemas pudo ser más gradual (Claussen *et al.*, 1999; Renssen *et al.*, 2003). Se ha podido establecer una relación directa entre periodos de sequía

Figura 4.21. El silencio arqueológico en el Maestrazgo (cordillera Ibérica) durante el evento árido de 8200 AP (modificado de González Sampérez *et al.*, en prensa). A) curvas de probabilidad de ocupación (%) en distintas regiones geográficas y comparación con diversos registros paleoambientales; B) anomalía de altura definida a partir de las crisófitas en el Pirineo (Plá and Catalán, 2005); C) cambios en los porcentajes de *Juniperus* y árboles mesotermófilos en El Portalet (González-Sampérez *et al.*, 2006); D) Curva de azufre como indicador de aridez en la laguna de Estanya (Morellón *et al.*, 2008); E) episodios de avenidas fluviales en la Península Ibérica (Thorndyraft and Benito, 2006); F) el registro de Menorca (Sondeo MD99-2343): potasio (K) (%) y silice/aluminio marcan la intensidad de las corrientes marinas profundas (Frigola *et al.*, 2007) y G) el registro isotópico del sondeo de hielo GISP2 (Grootes and Stuiver, 1997). La banda gris marca el evento 8.2 cal yr BP definido en el registro GISP2.

más intensos y con mayor frecuencia de recurrencia y el colapso de la cultura maya gracias al estudio de los sedimentos en los lagos próximos a las grandes ciudades mayas (Hodell *et al.*, 1995, 2001). Otros ejemplos más cercanos son la crisis de aridez en la pradera norteamericana (Dust Bowl) en los años treinta del siglo pasado (Fritz *et al.*, 2000).

En la Península Ibérica, migraciones pre-Neolíticas en el sector sureste del valle del Ebro (Maestrazgo) se han relacionado con la crisis de aridez desencadenada por el evento frío y seco en torno a los 8200 años que se



reconoce en toda Europa (figura 4.21) (González-Sampériz *et al.*, en prensa). Los sedimentos depositados en los lagos también reflejan los cambios en las sociedades humanas del pasado. Las praderas supra alpinas de zonas amplias de la montaña pirenaica tienen su origen en la deforestación durante la Edad Media para crear pastos de verano dentro del régimen de transhumancia; estos cambios en las comunidades vegetales y el consiguiente aumento en la erosión del suelo quedan bien marcados en el tipo de polen y en los

sedimentos acumulados en los ibones pirenaicos (Tramacastilla, en el valle del Tena; García Ruiz y Valero Garcés, 1998). El aumento de la erosión del suelo desde la época medieval queda reflejado en numerosos registros lacustres (Estanya, por ejemplo en el pre-Pirineo aragonés; Morellón *et al.*, 2008; Zoñar, Córdoba; Martín-Puertas *et al.*, 2008). El registro de Zoñar permite caracterizar tres periodos de mayor influencia antrópica en el medio: la época ibero-romana, la Edad Media y el último siglo. Se

observan condiciones climáticas favorables (húmedas) durante el asentamiento íbero y romano mientras que la conquista cristiana del Valle del Guadalquivir se produjo al final del Periodo Cálido Medieval. El desarrollo urbano y agrícola alrededor de la laguna durante el último siglo ha tenido un impacto determinante en su tipo de sedimentación, en su aumento de la tasa de sedimentación y en el uso del espacio natural y del agua hasta la creación de una zona de espacio protegido en 1982.

Referencias

- AYALA-CARCEDO FRANCISCO J. E IGLESIAS LÓPEZ, A. (1996). *Impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, el diseño y la planificación hidrológica en la España peninsular*. Instituto Tecnológico y Geominero de España.
- BÁRCENA, M. A.; CACHO, I.; ABRANTES, F., SIERRA, F. J., GRIMALT, J. O., y FLORES, J. A. (2001). "Paleoproductivity variations related to climatic conditions in the Alboran Sea (Western Mediterranean) during the last Glacial-Interglacial transition. Diatom record". *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 167: 337-357.
- BARRIENDOS, M. (2002). "Los riesgos climáticos a través de la historia: avances en el estudio de episodios atmosféricos extraordinarios". En: F. J. Ayala-Carcedo y J. Olcina (eds.). *Riesgos naturales*, Ariel, Barcelona, 549-562.
- BENITO, G.; BARRIENDOS, M.; LLASAT, C.; MACHADO, M. y THORNDYCRRAFT, V. R. (2005). "Impactos sobre los riesgos naturales de origen climático". En: *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático* (J. M. Moreno, coordinador), Ministerio de Medio Ambiente, 527-548.
- BOND, G.; SHOWERS, W.; ELLIOT, M.; EVANS, M.; LOTTI, R.; HAJDAS, I.; BONANI, G. & JOHNSON, S. (1999). "The North Atlantic's 1-2 kyr climate rhythm: relation to Heinrich events, Dansgaard/Oeschger cycles and the Littel Ice Age". En: Clark, P.; Webb, R.; y Keigwin, L. (eds). *Mechanisms of Global climate change at millennial time scales. Geophysical Monograph* 112: 35-58.
- BOND, G., W. SHOWERS, *et al.* (1997). "A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates". *science* 278(5341): 1257-1266.
- BROECKER, W. S. (1991). "The Great Ocean Conveyor". *Oceanography*, 4: 79-89.
- CACHO, I.; GRIMALT, J. O.; CANALS, M.; SBAFFI, L.; SHACKLETON, N. J.; SCHÖNFELD, J., y ZAHN, R. (2001). "Variability of the western Mediterranean Sea surface temperatures during the last 25,000 years and its connection with the northern hemisphere climatic changes". *Paleoceanography* 16: 40-52.

- CACHO, I.; GRIMALT, J. O.; CANALS, M.; SBAFFI, L.; SHACKLETON, N. J.; SCHÖNFELD, J., y ZAHN, R.(2001). "Variability of the western Mediterranean Sea surface temperature during the last 25,000 years and its connection with the Northern Hemisphere climatic changes". *Paleoceanography* 16(1), 40-52.
- CACHO, I.; GRIMALT, J. O.; PELEJERO, C.; CANALS, M.; SIERRA, F. J.; FLORES, J. A. y SHACKLETON, N. (1999). "Dansgaard-Oeschger and Heinrich event imprints in Alboran Sea paleotemperatures". *Paleoceanography* 14: 698-705.
- CHAPMAN, S. (1930). "A Theory of Upper-Atmospheric Ozone". *Memoirs of the Royal Meteorological Society* 3: 103-125.
- CHEDDADI, R.; YU, G.; GUIOT, J.; HARRISON, S. P. & COLIN PRENTICE, I. (1997). "The Climate of Europe 6000 years ago". *Climate Dynamics*, 13: 1-19.
- CLAUSSEN, M.; KUBATZKI, C.; BROVKIN, V.; GANOPOLSKI, A.; HOELZMANN, P. y PACHUR, H. J. (1999). "Simulation of an abrupt change in Saharan vegetation in the mid-Holocene", *Geophys. Res. Lett.*, 26: 2037-2040.
- COSGROVE, W. J. y RIJSBERMAN, F. R. (2000). *World Water Vision: Que el agua sea asunto de todos*. London: Earthscan Publications.
- CRUTZEN, P. J. (1970). "The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 96: 320-325.
- CULLEN, H.; DEMENOCAL, P.; HEMMING, S. R.; BROWN, F. H.; GUILDERSON, T. P. y SIROCKO, F. (2000). "Climate change and the collapse of the Akkadian empire: evidence from the deep sea". *Geology* 28: 379-382.
- DAHLBACK, A. (2002). "Recent changes in surface solar ultraviolet radiation and stratospheric ozone at a high Arctic site". En D. Hessen, ed. *UV Radiation and Arctic Ecosystems*. Berlín-Heidelberg: Springer-Verlag, 2002, 3-22.
- DANSGAARD, W.; JOHNSEN, S. J.; CLAUSEN, H. B.; DAHL-JENSEN, D.; GUNDESTRUP, N. S.; HAMMER, C. U.; HVIDBERG, C. S.; STEFFENSEN, J. P.; SVEINBJÖRNSDÓTTIR, A.E.; JOUZEL, J. y BOND, G. (1993). "Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record". *Nature*, 364: 218-220.
- DE ALBA, S.; BENITO, G. y PÉREZ GONZÁLEZ, A. (1998). "Erosión de suelo en episodios de lluvia de elevada intensidad versus episodios de moderada y baja intensidad y elevada frecuencia, en ambientes semiáridos". En: A. Gómez Ortiz y F. Salvador Franch (eds.), *Investigaciones recientes de la Geomorfología española*, pp. 483-492.
- DEMENOCAL, P.; ORTIZ, J.; GUILDERSON, T. P. y SARNTHEIN, M. (2000). "Coherent high- and low-latitude climate variability during the Holocene warm period". *Science*, 288: 2198-2202.
- DEMENOCAL, P.; ORTIZ, J.; GUILDERSON, T. P.; ADKINS, J. F.; SARNTHEIN, M.; BAKER, L. y YARUNSIKY, M. (2000). "Abrupt onset and termination of the African Humid Period: rapid climate responses to gradual insolation forcing". *Quaternary Science Reviews* 19: 347-361.
- DUPLESSY, J. C.; CORTJO, E., et al. (2005). "Marine records of Holocene climatic variations". *Comptes Rendus Geoscience*, 337(1-2): 87-95.
- FARMAN, J. C.; GARDINER, B. G. y SHANKLIN, J. D. (1985). "Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction". *Nature* 315: 207-210.
- FEELY, R. A.; SABINE, C. L.; LEE, K.; BERELSON, W.; KLEYPAS, J.; FABRY, V. J. y MILLERO, F. (2004). "J. Impact of Anthropogenic CO2 on the CaCO3 System in the Oceans". *Science*, 305: 362-366.
- FRIGOLA, J.; MORENO, A.; CACHO, I.; CANALS, M.; SIERRA, F. J.; FLORES, J. A.; GRIMALT, J. O. (2008). "Evidence of abrupt changes in Western Mediterranean Deep Water circulation during the last 50 kyr: A high-resolution marine record from the Balearic Sea". *Quaternary International*, 181(1): 88-104.
- FRTZ, S. C.; ITO, E.; YU, Z. C.; LAIRD, K. R. y ENGSTROM, D. R. (2000). "Hydrologic variation in the northern Great Plains during the last two millennia". *Quaternary Res*, 53: 175-184.
- GARCÍA-HERRERA, R.; DÍAZ, J.; TRIGO, R. y HERNÁNDEZ, E. (2005). "Extreme summer temperatures in Iberia: health impacts and associated synoptic conditions". *Annales Geophysicae*, 23: 239-251.
- GARCÍA-RUIZ, J. M. y VALERO-GARCÉS, B. L. (1998). "Historical geomorphic processes and human activities in the central Spanish Pyrenees". *Mountain Research and Development*, 18 (4): 309-320.

- GASSE, F. (2000). "Hydrological Changes in the African Tropics Since the Last Glacial Maximum". *Quaternary Science Reviews*, 19: 189- 211.
- GIRALT, S.; BURJACHS, F.; ROCA, J. R. y JULIA, R. (1999). "Late Glacial to Early Holocene environmental adjustment in the Mediterranean semi-arid zone of the Salines playa-lake (Alicante, Spain)". *Journal of Paleolimnology*, 21: 449-460.
- GONZÁLEZ-SAMPÉRIZ, P.; UTRILLA, P.; MAZO, C.; VALERO-GARCÉS, B.; SOPENA, M. C.; MORELLÓN, M.; SEBASTIÁN, M.; MORENO, A. y MARTÍNEZ-BEA, M. "Patterns of human occupation during the Early Holocene in the Central Ebro Basin (NE Spain): a response to the 8200 yr BP climate event". *Quaternary Research* (en prensa).
- GONZÁLEZ-SAMPÉRIZ, P.; VALERO-GARCÉS, B. L.; MORENO, A.; JALUT, G.; GARCÍA-RUIZ, J. M.; MARTÍ-BONO, C.; DELGADO-HUERTAS, A.; NAVAS, A.; OTTO, T.; DEDOUBAT, J. J. (2006). "Climate variability in the Spanish Pyrenees for the last 30,000 yr: El Portalet peatbog sequence". *Quaternary Research*, 66: 38-52.
- GROOTES, P. M.; STUIVER, M. (1997). "Oxygen 18/16 variability in Greenland snow and ice with 10-3 to 10-5 year time resolution". *Journal of Geophysical Research*, 102, 26455-26470.
- HARRISON, S. P.; PRENTICE, I. C., et al. (1992). "Influence of Insolation and Glaciation on Atmospheric Circulation in the North-Atlantic Sector - Implications of General-Circulation Model Experiments for the Late Quaternary Climatology of Europe". *Quaternary Science Reviews* 11(3): 283-299.
- HEMMING, S. R. (2004). "Heinrich events: Massive late pleistocene detritus layers of the North Atlantic and their global climate imprint". *Reviews of Geophysics* 42, RG1005.
- HODELL, D. A.; BRENNER, M.; CURTIS, J. H. Y GUILDERSON, T. P. (2001). "Solar forcing of drought frequency in the Maya Lowlands". *Science*, 292: 1367-1370.
- HODELL, D. A.; CURTIS, J. H., Y BRENNER, M. (1995). "Possible role of climate in the collapse of the Classic Maya Civilization". *Nature* 375: 391-394.
- HU, H. Y NEELIN, J.D. (2005). "Dynamical mechanisms for African monsoon changes during the mid-Holocene". *Journal of Geophysical Research* 110, doi 10.1025/2005JD005806.
- IGLESIAS, A.; ESTRELA, T. y GALLART, F. (2005). "Impactos sobre los recursos hídricos". En: *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático* (J. M. Moreno, coordinador), Ministerio de Medio Ambiente, 303-353.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of IPCC*. McCarthy, J. J.; Canziani, O. F.; Leary, N. A.; Dokken D. J.; White, K. S. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1005 pp.
- JURADO, E.; JAWARD, F.; LOHMANN, R.; JONES, K. C.; SIMÓ, R. y DACHS, J. (2005). "Wet deposition of persistent organic pollutants to the global oceans". *Environmental Science & Technology* 39: 2426-2435.
- KUHNLEIN, H. V. y CHAN, H. M. (2000). "Environment and contaminants in traditional food systems of northern indigenous peoples". *Annual Review of Nutrition*, 20: 595-626.
- KUTZBACH, J. E.; GUETTER, P. J.; BEHLING, P. J. Y SELIN, R. (1993). "Simulated climatic changes: results of the COHMAP climate-model experiment's". In: Wright, H. E.; Jr. Kutzbach, J. E.; Webb, T.III; Ruddiman, W. F.; Street-Perrot, F. A. y Bartlein, P. J. (eds.). *Global Climates since the Last Glacial Maximum*: 24-93. University of Minnesota Press, Minneapolis.
- LEAN, G. (1995). *Down to Earth. Secretariat of the Convention to Combat Desertification*. United Nations. Bonn, Alemania.
- LUQUE, J. A. Y JULIA, R. (2002). "Lake sediment response to land-use and climate change during the last 1000 years in the oligotrophic Lake Sanabria (NW Iberian Peninsula)". *Sedimentary Geology*, 148: 343-355.
- MARTÍNEZ-RUIZ, F.; PAYTAN, A.; KASTNER, M.; GONZÁLEZ-DONOSO, J. M.; LINARES, D.; BERNASCONI, S. M. Y JIMÉNEZ-ESPEJO, F. J. (2003). "A comparative study of the geochemical and mineralogical characteristics of the S1 sapropel in the western and eastern Mediterranean". *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 190: 23-37.

- MARTÍN-PUERTAS, C.; VALERO-GARCÉS, B. L.; BRAUER, A.; MATA, M. P.; DELGADO-HUERTAS, A. y DULSKI, P. "The Iberian-Roman Humid Period (2600-1600 cal yr. BP) in the Zoñar Lake varve record (Andalucía, Southern Spain). *Quaternary Research* (en prensa).
- MARTÍN-PUERTAS, C.; BLAS, L.; VALERO-GARCÉS, M.; PILAR MATA, PENÉLOPE; GONZÁLEZ-SAMPÉRIZ, ROBERTO BAO; MORENO, ANA Y STEFANOVA, VANIA (2008). "Arid and humid phases in Mediterranean Southern Spain during the last 4000 years: The Zoñar Lake record", *Córdoba. The Holocene*, 18: 907-921.
- MARTRAT, B.; GRIMALT, J. O.; LOPEZ-MARTINEZ, C.; CACHO, I.; SIERRA, F. J.; FLORES, J. A.; ZAHN, R.; CANALS, M.; CURTIS, J. H. Y HODELL, D.A. (2004). "brupt temperature changes in the western Mediterranean over the past 250,000 years". *Science*, 306: 1762-1765.
- MAYEWSKI, P. A.; ROHLING, E. J.; STAGER, J. C.; KARLÉN, W.; MAASCH, K. A., MEEKER, L. D.; MEYERSON, E. A.; GASSE, F.; VAN KREVELD, S. A.; HOLMGREN, C. A.; LEE-THORP, J. A.; ROSQVIST, G.; RACK, F.; STAUBWASSER, M.; SCHNEIDER, R. Y STEIG, E. J. (2004). "Holocene climate variability". *Quaternary Res*, 62: 243-255.
- MOLINA, M. J. Y F. S. ROWLAND (1974). "Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom catalysed destruction of ozone". *Nature*, 249: 810-812.
- MORELLÓN, M.; VALERO-GARCÉS, B.; MORENO, A.; GÓNZALEZ-SAMPÉRIZ, P.; MATA, P.; ROMERO, O.; MAESTRO, M. Y NAVAS, A. (2008). "Holocene Paleohydrology and climate variability in northeastern Spain: The sedimentary record of Lake Estanya (Pre-Pyrenean Range)". *Quaternary International*, 181: 15-31.
- MORELLÓN, M.; VALERO-GARCÉS, B.; VEGAS, T.; GONZÁLEZ-SAMPÉRIZ, P.; DELGADO-HUERTAS, A.; MATA, P.; MORENO, A.; RICO, M.; CORELLA, J. P. submitted. "Late glacial and Holocene palaeohydrology in the western Mediterranean region: the Lake Estanya record (NE Spain)". *Quaternary Science Reviews*.
- MORENO, A.; VALERO-GARCÉS, B.; GONZÁLEZ-SAMPÉRIZ, P.; MORELLÓN, M. Y RICO, M. (2008). "Flood response to rainfall variability during the last 2000 years inferred from the Taravilla Lake record (Central Iberian Range, Spain)". *Journal of Paleolimnology*. DOI 10.1007/s10933-008-9209-3.
- MORENO, A.; CACHO, I.; CANALS, M.; GRIMALT, J.; SÁNCHEZ GOÑI, M. F.; SHACKLETON, N. J. Y SIERRA, F. J. (2005). "Links between marine and atmospheric processes oscillating at millennial time-scale. A multy-proxy study of the last 50,000 yr from the Alboran Sea (Western Mediterranean Sea)". *Quaternary Science Reviews*, 24: 1623-1636.
- MORENO, A.; CACHO, I.; CANALS, M.; PRINS, M. A.; SÁNCHEZ GOÑI, M. F.; GRIMALT, J. O. Y WELTJE, G. J. (2002). "Saharan dust transport and high-latitude glacial climatic variability: the Alboran Sea record". *Quaternary Research*, 58: 318-328.
- MUIR, D. C. G. y HOWARD, P. H. (2006). "Are there other persistent organic pollutants? A challenge for environmental chemists". *Environmental Science Technology*, 40: 7157-7166.
- PENNER, J. E.; HEGG, D.; LEITCH, R. (2001). "Unraveling the role of aerosols in climate change." *Environ. Sci. Technol.*, Aug. 1: 332A-340A.
- PÉREZ OBIOL R, Y JULIÀ, R. (1994). "Climatic Change on the Iberian Peninsula recorded in a 30,000-yr pollen record from Lake Banyoles". *Quaternary Research*, 41: 91-98.
- PÉREZ-FOLGADO, M.; SIERRA, F. J.; FLORES, J. A.; GRIMALT, J. O.; ZAHN, R. (2004). "Paleoclimatic variations in foraminifer assemblages from the Alboran Sea (Western Mediterranean) during the last 150 ka in ODP Site 977". *Marine Geology*, 212 (1-4): 113-131.
- PÉREZ-OBIOL, R.; JULIÀ, R. (1994). "Climatic Change on the Iberian Peninsula Recorded in a 30,000-Yr Pollen Record from Lake Banyoles". *Quaternary Research*, 41 (1), 91-98.
- PLÁ, S.; CATALÁN, J. (2005). "Chrysophyte cysts from lake sediments reveal the submillennial winter/spring climate variability in the northwestern Mediterranean region throughout the Holocene". *Climate dynamics*, 24, 263-278.
- RENSSEN, H.; BROVKIN, V.; FICHEFET, T. Y GOOSSE, H. (2003). "Holocene climate instability during the termination of the African Humid Period". *Geophys. Res. Lett.*, 30: 33-31, 33-34.
- RIEBESELL, U.; ZONDERVAN, I.; ROST, B.; TORTELL, P. D.; ZEEBE, R. E.; MOREL, F. M. M. (2000). "Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO₂". *Nature*, 407: 364-367.

- RODRÍGUEZ-PUEBLA, C.; ENCINAS, A. H.; NIETO, S.; GARMENDIA, J. (1998). "Spatial and temporal patterns of annual precipitation variability over the Iberian Peninsula". *International Journal of Climatology*, 18: 299-316.
- RUIZ ZAPATA, B. (eds.) (2002). "Quaternary climatic changes and environmental crises in the Mediterranean region". Congreso PAGES-España, Universidad de Alcalá.
- SABINE, C. L.; FEELY, R. A.; GRUBER, N.; KEY, R. M.; LEE, K.; BULLISTER, J. L.; WANNINKHOF, R.; WONG, C.S.; WALLACE, D.W.R.; TILBROOK, B.; MILLERO, F. J.; PENG, T. H.; KOZYR, A.; ONO, T. y RÍOS, A. F. (2004). "The oceanic sink for anthropogenic CO₂". *Science*, 305: 367-371.
- SÁNCHEZ GOÑI, M. F. Y HANNON, G.E. (1999). "High - altitude vegetational pattern on the Iberian Mountain Chain (north - central Spain) during the Holocene". *The Holocene*, 9: 39-57.
- SÁNCHEZ-GOÑI, M. F.; CACHO, I.; TURON, J. L.; GUIOT, J.; SIERRA, F. J.; PEYPOUQUET, J. P.; GRIMALT, J. O. Y SCHACKLETON, N. J. (2002). "Synchronicity between marine and terrestrial responses to millennial scale climatic variability during the last glacial period in the Mediterranean region". *Climate Dynamics*, 19: 95-105.
- SARMIENTO, J. L. y GRUBER, N. (2002). *Sinks for anthropogenic carbon. Physics Today*. American Institute of Physics S-0031-9228-0208-010-9.
- SCHWARZENBACH, R. P.; GSCHWEND, P. M.; IMBODEN, D. M. (2003). *Environmental Organic Chemistry*. Wiley-Interscience, New York.
- SEINFELD, J. H. y PANDIS, S. N. (1998). *Atmospheric Chemistry and Physics. From air pollution to climate change*. John Wiley & Sons, New York.
- SHIKLOMANOV, I. A. (1999). *World water resources and their use*. CD-ROM "Freshwater Resources", IHP-UNESCO, París.
- SMAKHTIN, V.; REVENGA, C. y DÖLL, P. (2004). "Taking into account environmental water requirements in global-scale water resources assessments". *Comprehensive Assessment Research Report*, nº 2. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- SOLOMON, S. (1999). "Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history". *Reviews of Geophysics* 37: 275-316.
- STAEHELIN, J.; HARRIS, N. R. P; APPENZELLER, C. y EBERHARD, J. (2001). "Ozone trends: a review". *Reviews of Geophysics* 39 (2001): 231-290.
- TAKAHASHI, T.; SUTHERLAND, S. C.; SWEENEY POISSON, C. A.; METZL, N.; TILBROOK, B.; BATES, N.; WANNINKHOF, R.; FEELY, R. A.; SABINE, C.; OLAFSSON, J. y NOJIRI, Y. (2002). "Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects". *Deep-Sea Res. II*, 49: 1601-1622.
- THORNDYCRRAFT, V. R.; BENITO, G. (2006) "The Holocene fluvial chronology of Spain: evidence from a newly compiled radiocarbon database". *Quaternary Science Reviews* 25: 223-234.
- VALERO-GARCÉS, B. L.; NAVAS, A.; MACHÍN, J.; STEVENSON, T. Y DAVIS, B. (2000). "Responses of a saline lake ecosystems in semi-arid regions to irrigation and climate variability. The history of Salada Chiprana, Central Ebro Basin, Spain". *Ambio*, 26 (6): 344-350.
- VALERO-GARCÉS, B. L.; ZEROUAL, E., Y KELTS, K. (1998). "Arid phases in the western Mediterranean region during the Last Glacial Cycle reconstructed from lacustrine records". In: *Paleohydrology and Environmental Change*, G Benito., V. R. Baker y K. J. Gregory (eds.), pp. 67-80, Wiley & Sons. London.
- VALLEJO, V. R.; DÍAZ FIERROS, F. y DE LA ROSA, D. (2005). "Impactos sobre los recursos edáficos". En: Moreno, J. M. (coord.), *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*, 355-397.
- WEATHERHEAD, E. C., y ANDERSEN, S. B. (2006). "The search for signs of recovery of the ozone layer". *Nature* 441: 40-45.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (2002). "Global Solar UV Index: a practical guide". WHO Library Cataloging-in-Publication data. Geneva, Suiza.
- WORLD RESOURCES INSTITUTE (1998). *World Resources 1998-99*. Report available at <http://www.wri.org>.

5. Cambio climático

5.1. ¿Qué es el cambio climático?

La mayor parte de nosotros comparte la sensación de que el clima, que representa las condiciones medias del tiempo atmosférico, está cambiando. Esta percepción del cambio en el clima se basa generalmente en la comparación de los inviernos o veranos actuales con los existentes durante nuestra niñez. Lo cierto es que el clima ha variado constantemente desde el origen de nuestro planeta hace más de 4.500 millones de años. Estos cambios (figura 5.1) no sólo se han producido a escala geológica (millones de años), sino también en nuestra historia reciente (últimos miles y cientos de años).

Los periodos glaciares e interglaciares experimentados durante el Cuaternario (últimos 2,6 millones de años)

constituyen momentos extremos de avance y retroceso de los casquetes glaciares desde las zonas polares hacia latitudes ecuatoriales. Dentro de estos grandes ciclos glaciares e interglaciares, existen variaciones importantes en las condiciones climáticas medias (figura 5.1). En los últimos mil años, se han producido dos variaciones reseñables de signo climático opuesto: 1) el periodo “cálido” conocido como Periodo Cálido Medieval (entre los años 900-1200 d.C.); y 2) el periodo frío denominado como Pequeña Edad del Hielo (entre los años 1550 y 1850 d.C.).

Durante el Periodo Cálido Medieval existen referencias históricas que señalan la expansión de los viñedos en el sur de Inglaterra, y la retirada de los glaciares a cotas más elevadas. Posteriormente, en la Pequeña Edad del Hielo desaparecieron los viñedos de

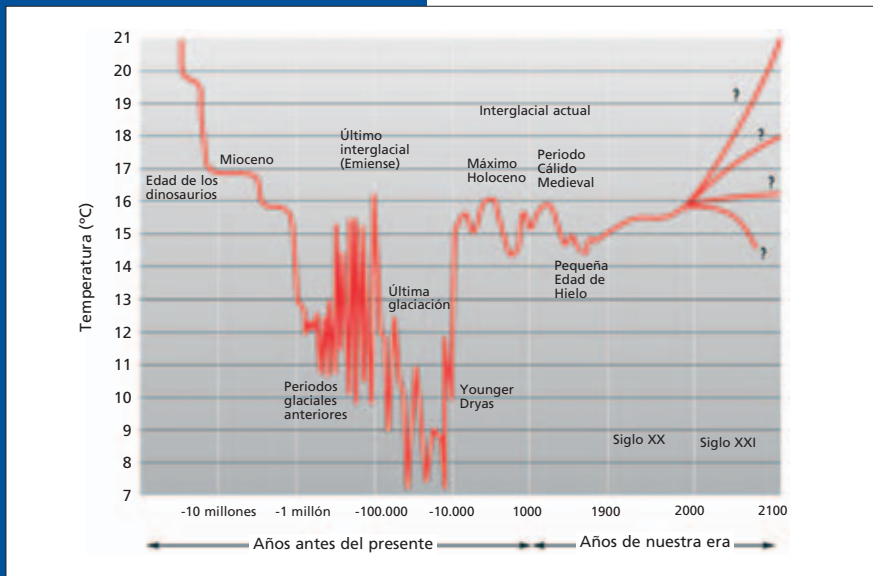


Figura 5.1. Variación de la temperatura media de la Tierra a escala geológica. El eje X de tiempo está representado en escala logarítmica.

Fuente: Bureau of Meteorology, Commonwealth of Australia 2006
[\(http://www.bom.gov.au/info/climate/change/gallery/\)](http://www.bom.gov.au/info/climate/change/gallery/).

Inglaterra, y se hizo difícil el cultivo de cereal en Islandia. Los registros históricos, desde el siglo XVI al XVIII, sugieren la existencia de una fase más fría con un máximo de dichas condiciones para el siglo XVII. Durante estos siglos, varios ríos llegaron a helarse, siendo destacables las once heladas ocurridas entre los años 1503 y 1697 en el río Ebro en Tortosa (a 15 km de la costa), destacando el invierno de 1693-1694 donde el hielo alcanzó un espesor de 3 m. Igualmente, el río Tajo se heló 5 veces a su paso por Toledo durante el mismo periodo.

Las variaciones recientes en el clima (figura 5.2) se han relacionado con ciclos de la actividad solar, grandes

erupciones volcánicas y la composición atmosférica, y fundamentalmente de los gases traza de origen natural (H_2O , O_3 , CO_2 , N_2O , CH_4).

¿Qué hace diferente el cambio climático actual a los cambios registrados en el pasado?

En la actualidad el hombre tiene capacidad de afectar directamente al sistema climático, tal y como se ha puesto de manifiesto con la masiva emisión de gases con efecto invernadero resultado de la utilización de combustibles fósiles. En este sentido, existen evidencias claras que relacionan esta emisión creciente de gases a la atmósfera durante el siglo XX con un incremento medio de la temperatura global de $0,6^\circ C$ (media de la temperatura de la superficie terrestre y superficie del mar, IPCC, 2001; figura 5.3).

Este incremento de temperatura se ha acelerado desde los años 70 y parece haber sufrido una nueva aceleración en lo que llevamos de siglo XXI, paralelamente al incremento de las emisiones de gases con efecto invernadero, algunos que ya existían de forma natural (CO_2 , CH_4 , N_2O y vapor de agua) y otros con origen exclusivamente humanos como los clorofluorometanos (CFC's). Sin embargo, la emisión de estos gases debido a las actividades humanas está produciendo un incremento medio de

la temperatura global que puede afectar a diferentes sistemas de la hidrosfera-geosfera y biológicos de nuestro planeta. En definitiva, la tendencia climática actual es el resultado de una variabilidad climática natural alterada por la emisión de gases con efecto invernadero, cuyo resultado evidente es el aumento de la temperatura del aire y de los océanos.

Las emisiones importantes de gases con efecto invernadero se inician a comienzos del siglo XX, asociadas a la quema de masas forestales y de matorral para ampliar las zonas cultivables. Sin embargo, las emisiones masivas de estos gases asociadas al uso generalizado de combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural) se han registrado en la segunda mitad del siglo XX, y particularmente en las últimas dos décadas, con un incremento de alrededor del 25% en los niveles de algunos de estos gases.

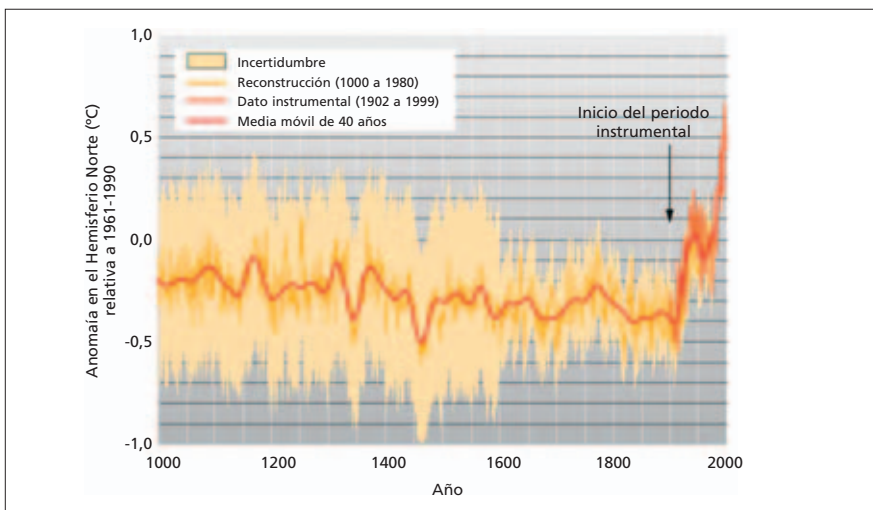


Figura 5.2. Reconstrucción de la variación media de la temperatura del Hemisferio Norte en los últimos 1.000 años, de los que los últimos 100 corresponden a medidas directas y el resto han sido reconstruidos a partir de indicadores.

Fuente: Bureau of Meteorology, Commonwealth of Australia 2006 (<http://www.bom.gov.au/info/climate/change/gallery/>).

La concentración media de dióxido de carbono antes de la Revolución Industrial (año 1750) era de unas 280 partes por millón en volumen

(0,028%), elevándose hasta 315 ppm (0,0315%) en 1958, y en la actualidad se aproxima a los 380 ppm (0,038%). Esto significa que la concentración de CO₂ en el aire se ha incrementado a un ritmo medio anual de 1,5 ppm, lo que equivale al 0,5% anual. Por su parte, el metano (CH₄) representa el 9% del total de las emisiones y se genera durante la producción y transporte del carbón, gas natural y petróleo, así como de la descomposición de desechos orgánicos en vertederos, y en la ganadería. Los niveles de metano se han duplicado en el último siglo desde sólo 0,7 ppmv, hasta los actuales 1,7 ppmv, aunque el ritmo de incremento ha

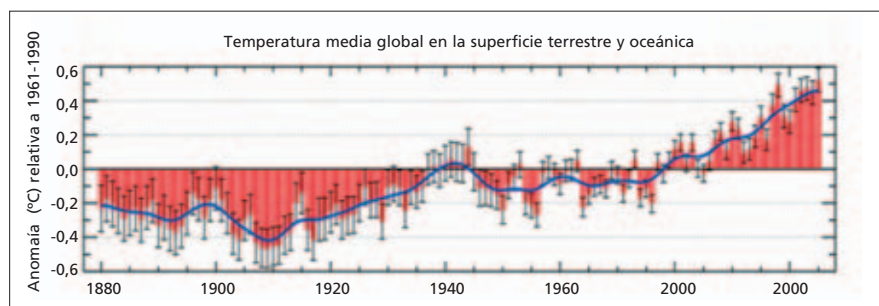


Figura 5.3. Anomalía de la temperatura media global de la superficie terrestre y oceánica durante el período instrumental en relación al promedio del período 1961-1990 (que se fija como 0).

Fuente: NOAA, USA.

disminuido en los últimos años. El óxido nitroso (N₂O) se emite durante las actividades industriales y agrícolas, así como en la combustión de desechos sólidos y combustibles fósiles, representando el 5% del total de las emisiones. La cantidad de óxido nitroso ha pasado de 0,275 ppmv en la era preindustrial a alcanzar en la actualidad los 0,310 ppmv, lo que supone un incremento del 0,25% anual, con una emisión media actual de unos siete millones de toneladas. Los halocarburos representan el 2% del total de las emisiones y se emiten como subproductos de procesos industriales y a través de fugas.

La contribución de estos gases con efecto invernadero al calentamiento global depende de su concentración en la atmósfera, y de su capacidad de absorción de energía (tabla 5.1). Existen algunos gases cuyo origen se debe exclusivamente a procesos industriales,

ya que no existen en condiciones naturales, como los clorofluorocarburos (CFC-11 y CFC-12), los hidrofurocarburos (HFCs), los perfluorocarburos (PFCs) y el hexafluoruro de azufre (SF₆), y que presentan un elevado efecto invernadero. En este sentido, un gramo de clorofluorocarburos (CFC-11 y CFC-12) produce un efecto invernadero hasta 10.000 veces mayor que un gramo de CO₂, aunque este último contribuye en un 76% al calentamiento global debido a su elevada presencia en la atmósfera.

El concepto de potencial de calentamiento global (en inglés *global warming potential* GWP) se define como el efecto de calentamiento integrado a lo largo del tiempo que produce una liberación instantánea de 1 kg de un gas de efecto invernadero, en comparación con el causado por el CO₂ (tabla 5.1). Este concepto se ha

desarrollado para permitir la comparación de los efectos acumulados de calentamiento de diferentes gases con efecto invernadero, y contemplando tanto la capacidad de cada gas de intensificar el efecto invernadero, como su tiempo de permanencia en la atmósfera. El CO₂ se toma como patrón o elemento de referencia, asignándole un valor 1, mientras que el efecto del resto de los gases se calculan como múltiplos de este valor. Un potencial de calentamiento global de 21 para el metano (CH₄) significa que cada gramo de metano emitido tiene un efecto de calentamiento acumulado en los próximos cien años equivalente a la emisión de 21 gramos de CO₂. El valor resultante de la transformación de una cantidad de emisión de gas con efecto invernadero en su equivalente de dióxido de carbono se denota como CO₂E. Esta transformación en unidades de CO₂E permite realizar comparaciones y evaluar las tendencias futuras del efecto de las emisiones futuras. En la actualidad, Estados Unidos es el principal contribuyente a la emisión de gases con efecto invernadero, con Canadá siendo el país con mayores emisiones per cápita. Por sectores (figura 5.4), los procesos industriales generan la mayor parte de estos gases (32%), seguidos por los procesos relacionados con la generación de energía eléctrica (20%) y la agricultura (20%).

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CFC
Residencia en años	Variable	12.2 ±3	120	12-102
Niveles preindustriales	278 ppmv	0.7 ppmv	275 ppbv	0
Niveles en 1994	358 ppmv	1.7 ppmv	311 ppbv	0.105-0.503 ppbv
% de contribución al efecto invernadero	53	13	6-7	20
Potencial de calentamiento global con relación al CO ₂ (GWP*)	1	21	310	Varios entre 6200 - 10000

Tabla 5.1. Principales gases de efecto invernadero.

Fuente: UN Environmental Programme. Introducción al cambio climático (www.grida.no/climate/vital/intro.htm).

Ppmv: partes por millón de volumen.

Ppbv: partes por billón de volumen.

Gwp*: para un horizonte temporal de 100 años según el Second Assessment Report (SAR) de IPCC.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) sienta las bases para estabilización de la concentración de gases con efecto invernadero en la atmósfera en niveles que eviten el peligro de la interferencia antrópica en el sistema climático, a través de su Artículo 2, y que entró en vigor en 1994. En el denominado Protocolo de Kioto se acuerda reducir las emisiones totales de seis de estos gases (indicados en la tabla 5.2), en una media de 5,2 por ciento inferior a las emisiones de 1990.

5.2. Incertidumbres

El glosario del IPCC indica para incertidumbre: “Expresión del nivel de desconocimiento de un valor (como el

estado futuro del sistema climático). La incertidumbre puede ser resultado de una falta de información o de desacuerdos sobre lo que se conoce o puede conocer. Puede tener muchos

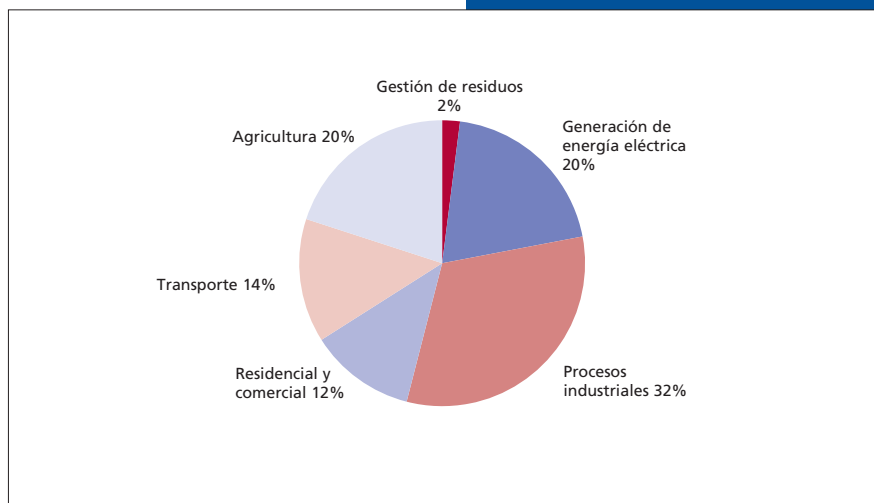


Figura 5.4. Distribución por sectores económicos de emisión de gases con efecto invernadero (CO₂, CH₄, y N₂O en CO₂E) incluidos en el Protocolo de Kioto en 1990
Fuente: Edgar, 2000.

Gas	Emisiones	Dióxido de carbono equivalente (CO ₂ E)
CO ₂	22.000	22.000
CH ₄	310	6.510
N ₂ O	10.5	3.264
HFCs	Sin datos	70
PFCs	Sin datos	117
SF ₆	0.006	139

Tabla 5.2. Emisiones antrópicas mundiales en 1990 (en millones de toneladas métricas), tomadas como referencia en el Protocolo de Kioto. Las emisiones de CO₂ se refieren a combustibles fósiles y otros procesos industriales, pero no incluyen las emisiones producidas de la conversión de bosques y pastos en zonas agrícolas y urbanas. Los valores de CO₂E corresponden a un horizonte temporal de 100 años.

Fuente: IPCC, 2001. HFCs: Hidrofluorocarburos. PFCs: Perfluorocarburos. SF₆: Hexafluoruro de azufre.

orígenes, desde errores cuantificables en los datos a conceptos o terminologías definidos ambiguamente, o proyecciones inciertas de conductas humanas. La incertidumbre se puede representar con valores cuantitativos (como una gama de valores calculados por varias simulaciones) o de forma cualitativa (como el juicio expresado por un equipo de expertos)”.

Repasando lo dicho con anterioridad, se pueden tener incertidumbres, y de hecho se tienen, derivadas de la ignorancia parcial de las causas del clima, del uso de los modelos e inherentes a los propios escenarios de emisiones. Algunas de ellas ya se han indicado al describir los motores del clima. A continuación se describirán otras que pueden resultar menos evidentes.

Papel de aerosoles y nubes

Su comportamiento en el sistema climático se acostumbra a referir al efecto invernadero y más concretamente si lo intensifican o lo atenúan. Tanto los aerosoles como las nubes pueden actuar en los dos sentidos. En un principio los aerosoles impedirían la llegada de radiación solar, atenuando el efecto invernadero, pero si su tiempo de residencia en la atmósfera es grande, lo que depende de su naturaleza, pueden reemitir radiación térmica hacia el suelo e intensificarlo. A lo dicho hay que añadir que es difícil conocer la evolución hacia

el futuro de su concentración, y no sólo lo que atañe a la actividad humana, sino también a causas naturales, como, por ejemplo, las erupciones volcánicas.

En cuanto a las nubes, su comportamiento depende, como ya se indicó, del tipo. Todos los escenarios de clima futuro prevén un clima global más caluroso y húmedo, con mayor nubosidad, pero el comportamiento radiativo de dicha nubosidad todavía no está claro.

Composición de la atmósfera, sumideros, escenarios de emisiones

La composición atmosférica es cambiante, sobre todo como consecuencia de la actividad humana y, principalmente, debido a la quema de combustibles fósiles. El efecto invernadero está producido por gases (también aerosoles) radiativamente activos, que reciben el nombre genérico de gases de efecto invernadero (GEI), que también son responsables de su intensificación si aumenta su concentración en la atmósfera. El principal contribuyente al efecto invernadero es el vapor de agua (aproximadamente un 80%) seguido del dióxido de carbono (algo menos del 20%) que, a su vez, es el máximo responsable de su intensificación (60%), seguido del metano (20%), óxido nitroso y otros gases. Cuando se habla de una cierta

concentración de GEI en la atmósfera, hay que tener en cuenta que, en principio, ésta resulta de una diferencia entre las emisiones de GEI y la cantidad de CO₂ equivalente que el sistema climático es capaz de fijar en los denominados sumideros (los más importantes: suelos, vegetación y océano, ver cuadro 5.1). Todos esos factores son portadores de incertidumbre y, sobre todo, de cara al futuro del sistema climático. Mención especial merecen los escenarios de emisiones, deducidos a partir de consideraciones socioeconómicas, difícilmente cuantificables y verificables particularmente ante posibles innovaciones tecnológicas, y las concentraciones de GEI que de ellos se deducen.

Carácter no lineal del sistema climático

Cuando los procesos que se dan en el sistema climático se consideran en conjunto, se observa que unos influyen en otros y que los resultados de la acción de dicho procesos considerados individualmente influyen en sus propias causas; estas complejas interacciones reciben el nombre de retroalimentaciones y constituyen un rasgo característico de los denominados sistemas no lineales y del sistema climático en particular.

El tratamiento analítico es muy difícil, si no imposible, siendo lo más adecuado su simulación mediante modelos, aunque éstos también muestran limitaciones a la hora de anticipar posibles respuestas no lineares.

Este comportamiento puede dar lugar a cambios inesperados en el estado del sistema y a otros imaginables, como podrían ser los cambios de clima rápidos. Algunos de ellos comprendían la reorganización de la circulación termohalina, la recesión de los glaciares, con sus efectos de retroalimentación sobre el albedo

global, o la fusión generalizada del permafrost. A su vez, estos cambios influyen en el ciclo del carbono.

Uso de modelos

Los modelos son aproximaciones de la realidad, establecidos tras simplificaciones diversas que, obviamente, siempre introducen incertidumbre. Para comentar sólo dos de ellas, hay que decir que la necesaria discretización espacial para que el proceso de cálculo se realice en tiempos razonables hace que los resultados de la simulación no

puedan ser aplicables directamente a escalas locales. El otro aspecto a comentar está relacionado con el tratamiento, no del todo satisfactorio, del vapor de agua en los modelos. Esto tiene importancia pues su presencia en la atmósfera aumenta con la temperatura, y al producirse un crecimiento de ésta se daría una realimentación, que no está adecuadamente resuelta en los modelos. La reducción de éstas y otras incertidumbres proporcionan una gran cantidad de líneas de investigación punteras activas en el mundo.

Más importante aún es aceptar que los modelos climáticos sólo pueden

Cuadro 5.1.

¿Qué son los sumideros?

Se denomina sumidero a cualquier proceso, actividad o mecanismo que retira de la *atmósfera* un *gas de efecto invernadero*, un *aerosol*, o un *precursor* de gases de efecto invernadero por un período de tiempo relevante climáticamente.

Existen sumideros naturales como son los procesos de captación de CO₂ atmosférico por parte de la vegetación terrestre, su acumulación en los sedimentos de lagos y su acumulación en las aguas intermedias y profundas y sedimentos de los océanos, que actualmente almacenan gran parte del CO₂ emitido por la actividad humana. Sin embargo, con el fin de poder mitigar las consecuencias del efecto invernadero se han hecho propuestas y experimentos para disminuir el CO₂ atmosférico consistente en separación de CO₂ emitido por la industria, su transporte y almacenamiento a largo

plazo. Esto sería un sumidero forzado que el IPCC considera como una de las opciones en la cartera de medidas de mitigación para la estabilización de concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero.

Dos ejemplos de este tipo de tecnologías de sumidero de CO₂ se realizan mediante su inyección en formaciones geológicas y en el océano, lo que es económicamente viable, aunque se sigue investigando.

Existen varias opciones de almacenamiento geológico, inyectando CO₂ en formaciones salinas, acuíferos profundos o yacimientos agotados de petróleo y gas a profundidades mayores de 800 m. A una profundidad de más de 800 m, el CO₂ adquiere una densidad de líquido (entre 500 y 800 kg por m³). El almacenamiento en capas de carbón puede realizarse a menos profundidad y depende de la

adsorción de CO₂ por la hulla. La viabilidad técnica depende en gran medida de la permeabilidad de la capa de carbón. La combinación del almacenamiento de CO₂ con la recuperación mejorada de petróleo o de metano en capas de carbón podría propiciar ingresos adicionales de la recuperación de petróleo o gas. Existen tres proyectos de almacenamiento a escala industrial en funcionamiento: el proyecto Sleipner en una formación salina marítima en Noruega, el proyecto Weyburn de recuperación mejorada de petróleo en el Canadá, y el proyecto In Salah en un yacimiento de gas de Argelia. Se continúan desarrollando tecnologías y métodos para la ejecución de proyectos de almacenamiento geológico. El almacenamiento oceánico podría llevarse a cabo de dos formas: mediante la inyección y disolución de CO₂ en la

columna de agua (por lo general, a más de 1.000 metros de profundidad) por medio de un gasoducto fijo o un buque en desplazamiento, o mediante el depósito de CO₂ por medio de un gasoducto fijo o una plataforma marítima en el fondo oceánico a más de 3.000 m de profundidad, donde el CO₂ tiene mayor densidad que el agua y se espera que forme un "lago" que retrasaría la disolución de CO₂ en el entorno (figura 5.6.). El almacenamiento oceánico y su impacto ecológico aún están en fase de investigación, ya que preocupa que la disolución del CO₂ reduzca el pH del agua de mar, acidificándola y afectando así a los organismos carbonatados. El CO₂ disuelto pasaría a formar parte del ciclo global del carbono y, llegado el momento, se estabilizaría con el CO₂ de la atmósfera. En los experimentos de laboratorio, se han realizado experimentos oceánicos a pequeña escala y simulaciones con modelos, y se han estudiado las tecnologías y los fenómenos físicos y químicos conexos, que incluyen, en particular, el aumento de la acidez (ver Sección 7) y sus efectos en los ecosistemas marinos para diversas opciones de almacenamiento oceánico.

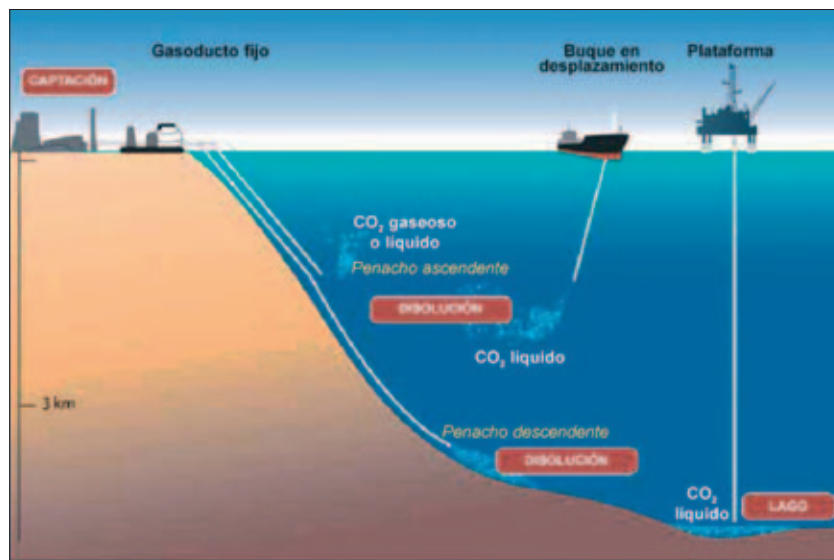


Figura 5.5. Visión general de almacenamiento o sumidero oceánico. En el almacenamiento oceánico por "disolución", el CO₂ se disuelve rápidamente en las aguas oceánicas, mientras que en el almacenamiento oceánico de "lago", inicialmente, el CO₂ es un líquido en el fondo oceánico (por gentileza del CO2CRC).

articular lo conocido y nunca incorporar lo desconocido. Por tanto están limitados por las fronteras del conocimiento científico. Presentan, además, un problema inherente de validación, pues las proyecciones futuras sólo se pueden validar cuando éstas se constatan, de forma que existe la posibilidad de que los modelos dejen de funcionar adecuadamente, subestimando o sobrestimando los cambios, por encima de umbrales determinados de cambio.

5.3. Cambio climático: ¿realidad, futuro o especulación?

Es evidente que, a la vista de las incertidumbres comentadas en el apartado anterior, cabe la pregunta: ¿cómo se puede dar por cierto el cambio climático?

Para tratar de dar respuesta a la pregunta anterior, se usará una línea argumental que tendrá tres fases; la primera hará referencia a los cambios ya

observados, la segunda a la seguridad en la mejor herramienta que se dispone para la simulación del clima y la tercera a las proyecciones del clima hacia el futuro.

Evolución del clima presente y aumento de concentración de los GEI

Desde el inicio de la Revolución Industrial, a mitad del siglo XVIII, la concentración de gases con efecto invernadero en la atmósfera ha aumentado considerablemente (ver como ejemplo la tabla 5.1). En paralelo, la temperatura media en superficie del planeta ha aumentado cerca de 1°C^1 en los últimos cien años. Para ver el ritmo medio al que se está produciendo el calentamiento, la tendencia calculada para 1906-2005 es de $0,74 \pm 0,18^{\circ}\text{C}$ por siglo con una aceleración del cambio ya que para 1901-2000 se había calculado $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ por siglo. Esta aceleración del calentamiento se pone más claramente de manifiesto si se emplean sólo los últimos cincuenta años de los cien indicados (1956-2005) y más aún con los últimos veinticinco. En estos casos la tendencia resultante es $1,28 \pm 0,26^{\circ}\text{C}$ por siglo y $1,77 \pm 0,52^{\circ}\text{C}$ por siglo, respectivamente. Muy probablemente los aumentos de temperatura reseñados no tienen precedente en la Tierra

durante los últimos 16.000 años, por lo menos. Además, la década 1998-2007 ha sido la más cálida del registro instrumental; incluye los ocho primeros años de los diez más calurosos, con 1998 y 2005 en los dos primeros lugares. Estas observaciones son coherentes con la intensificación del efecto invernadero que predice la teoría y los modelos, pero hay más. Los modelos de simulación del clima indican también que, al producirse el calentamiento, los fenómenos climáticos extremos (sequías, lluvias fuertes, ciclones tropicales, olas de calor y frío...) cambian su frecuencia e intensidad, aumentando, excepto las olas de frío. Asimismo, como consecuencia de la dilatación del agua y de la fusión de los hielos continentales, debe aumentar el nivel medio del mar. Todo ello se está produciendo. En la mayoría de las montañas del mundo se está observando un retroceso en los glaciares y una reducción de la superficie del permafrost; el nivel del mar ha aumentado aproximadamente a un ritmo de 1,7 mm al año en el siglo XX, superando en 2007 en unos 20 cm la media de 1870; las olas de calor son cada vez más frecuentes y producen un mayor número de defunciones y, como dato a destacar, el número de ciclones tropicales que alcanzaron la categoría de

huracán en el Atlántico durante 2005 fue el mayor conocido, aumentando también su potencial destructivo. Además, se está produciendo una rápida disminución de la extensión del hielo ártico, que experimentó en el verano de 2007 una disminución sin precedentes.

Atribución del calentamiento a la actividad humana

Del segundo *Informe de Evaluación del Cambio Climático del IPCC*, publicado en 1995, se deducía que había sospechas razonables de la influencia de la actividad humana en los cambios observados del clima del planeta. O en los términos entonces publicados “sugieren una discernible influencia humana en el clima global”. Del segundo al cuarto informe, publicado en 2007, se ha producido un cambio sustancial, que a continuación se describe.

La confianza en la capacidad de los modelos para simular el clima viene, en primer lugar, por tener incluido todo el conocimiento presente del sistema climático y estar basados en las leyes físicas que rigen la dinámica atmosférica y oceánica. Además, para probar su bondad se simula el clima pasado conocido y el clima presente. Para este último, se parte de condiciones

1. El calentamiento medio observado ha sido de $0,8^{\circ}\text{C}$; probablemente el más intenso de los últimos mil años en el Hemisferio Norte. Si se hace referencia a tendencias calculadas, el valor es algo menor.

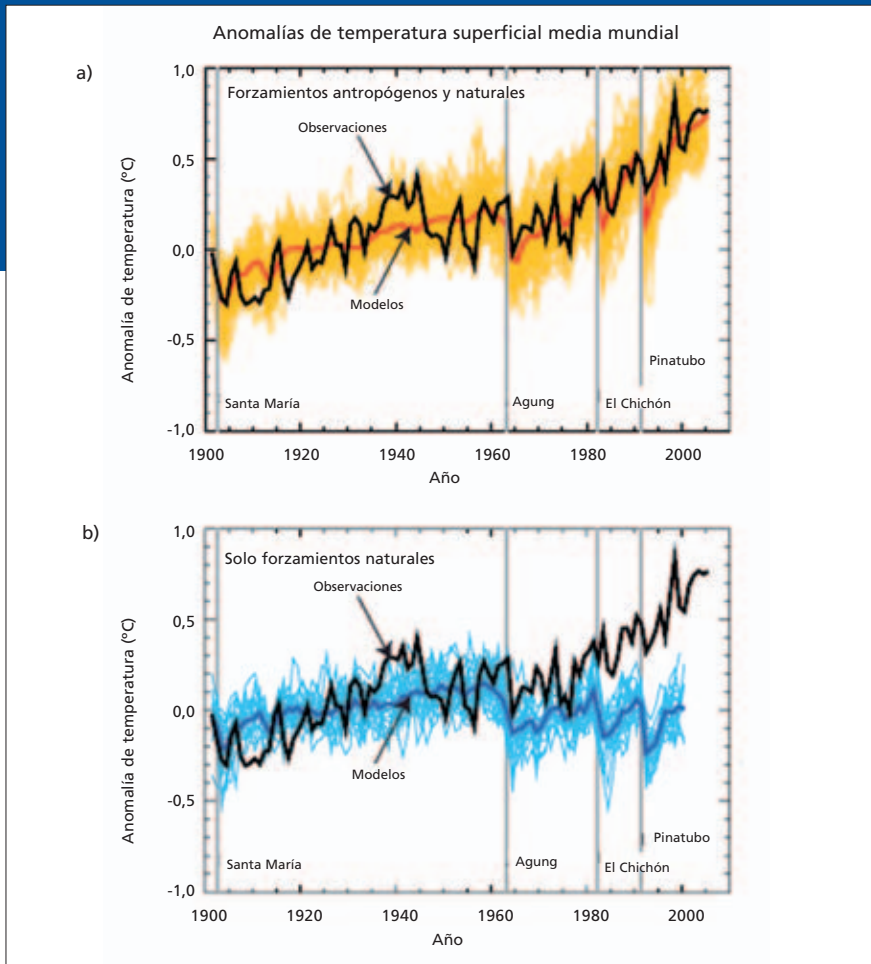


Figura 5.6. (a) Anomalías en la temperatura superficial media mundial relativas al periodo de 1901 a 1950, según observaciones (línea negra) y como resultado de simulaciones con forzamientos antropogénicos y naturales. La curva gruesa, en rojo, muestra la media del conjunto de varios modelos y cada línea delgada ocre muestra una simulación individual. Las líneas grises verticales indican importantes fenómenos volcánicos. (b) Igual que en (a), sólo que las anomalías simuladas de la temperatura media mundial son solamente para los forzamientos naturales. La curva gruesa azul muestra la media del conjunto de modelos y cada curva azul más clara muestra una simulación individual. Cada simulación fue realizada para que la cobertura temporal correspondiera con la de las observaciones.

Fuente: IPCC, 2007.

conocidas en el pasado y se van resolviendo las ecuaciones hasta llegar a nuestros días. No todos los modelos que se emplean en la actualidad para la simulación del clima dan los mismos resultados, pero se puede decir que, en conjunto, la simulación es más que satisfactoria. La media de todos ellos reproduce muy bien la evolución conocida de las variables y las diferencias entre ellos son adecuadas para simular la variabilidad observada del clima.

Como ejemplo, en la figura 5.1 se pueden ver los resultados de la comparación de la temperatura media global con la que simulan, en diferentes circunstancias, los modelos numéricos para el siglo XX. Tanto en el panel a) como en el b), la curva negra representa la evolución de la temperatura media en superficie para todo el planeta. Los valores numéricos deducidos de la escala de la izquierda son las diferencias de temperatura con respecto a la media en el periodo 1901-1950. La curva roja del panel a) representa la evolución media de la temperatura simulada. Para

Vista aérea del faro de Cap Salines, que alberga una estación de investigación costera (IMEDEA, CSIC-UIB).

Fotografía: C. M. Duarte.



obtenerla se promedian los resultados de cada uno de los modelos individuales, cuyas diferentes realizaciones aparecen representadas en ocre. Para esta simulación los modelos incluyen las causas conocidas del cambio de clima; en concreto las naturales, con inclusión de las erupciones volcánicas y aquéllas que son consecuencia de la actividad humana, por medio de las evoluciones conocidas de las concentraciones de GEI en la atmósfera y también de aerosoles. El resultado de este experimento de atribución se puede resumir diciendo que existe una buena correlación entre las evoluciones de la temperatura observada y simulada, que la envolvente de las simulaciones individuales incluye casi por completo la curva de observaciones y que la media de los modelos sería una buena aproximación de la observación, convenientemente filtrada por un promedio temporal (no mostrado en la figura).

En el panel b) se presenta el resultado de simular la evolución de la

temperatura pero sólo empleando las causas naturales del cambio de clima. Como antes, se representan las realizaciones individuales de los modelos, en azul claro, y la media de todas las simulaciones, en azul más oscuro. En este caso no se pueden sacar las mismas conclusiones. Los forzamientos naturales sólo pueden explicar la evolución de temperatura aproximadamente hasta mitad del siglo pasado. De hecho, si se comparan los dos paneles no se observan grandes

diferencias entre ambas simulaciones durante ese intervalo. Las diferencias aparecen en la segunda mitad del siglo XX. Es necesario introducir en las simulaciones las causas antrópicas para poder explicar la tendencia de la temperatura en la segunda mitad.

En el tercer informe del IPCC ya se habían realizado este tipo de experimentos pero las conclusiones no eran de tanta confianza como en el cuarto. Además ahora se han realizado estudios equivalentes para los diferentes



Cañón en las proximidades
de Benasque, Huesca.
Fotografía: C. M. Duarte.

continentes, para tierras y océano por separado y para otras variables distintas de la temperatura. Los resultados han sido coherentes con lo anteriormente expuesto.

La investigación climática debe tender siempre a reducir incertidumbres y paralelamente a conseguir que las simulaciones sean más realistas. Si se observa la figura 5.1, existe una discrepancia importante entre las simulaciones y la temperatura media en superficie, calculada a partir de medidas directas, en torno a 1940. Muy recientemente se ha publicado un trabajo en el que se da cuenta del análisis del origen de las observaciones de temperatura y se concluye que existe un sesgo en los valores observados como consecuencia del método que se usó para la medida de la temperatura superficial del mar que, obviamente, forma parte de la temperatura superficial del planeta. Si se corrigieran los valores observados se reduciría la discrepancia, acercándose la evolución observada de la temperatura a la simulada. En el momento de hacerse público el cuarto informe del IPCC lo anterior no se conocía, pero aun así se consideraban los resultados suficientemente realistas para indicar que “la mayor parte del aumento observado de la temperatura media global desde la mitad del siglo XX es muy probable² que sea consecuencia del incremento observado de la concentración de GEI antropogénicos”.

Hay que añadir, además, que son los resultados como los anteriores, y la simulación de los principales rasgos conocidos del clima del pasado, los que permiten tener confianza en la simulación del clima mediante modelos, a pesar de las incertidumbres, que se sabe existen, de todo el proceso de simulación.

Interpretación de los escenarios de emisiones

Visto lo anterior no es extraño que se pretenda proyectar el clima presente hacia el futuro. Como ya se ha indicado, esto se lleva a cabo empleando escenarios de emisiones. Nadie oculta que la probabilidad de que se dé exactamente alguno de los escenarios es francamente pequeña. Sin embargo, desde el punto de vista de la investigación del clima futuro, el camino a seguir está claro: las múltiples posibilidades que establecen los escenarios de emisiones permiten obtener un abanico de posibles escenarios climáticos futuros, y esto es así para cada uno de los modelos de simulación del clima empleados. A partir de estos resultados se pueden obtener estados climáticos futuros, de los que a veces se utilizan los extremos para estimar la variabilidad y alguno de los centrales para estimar un clima

futuro plausible. En resumen, es menos importante lo que dice individualmente cada uno de los escenarios de emisiones que el conjunto de los posibles climas futuros que nos permiten simular.

5.4. Los cambios climáticos abruptos, una incógnita más de la evolución de nuestro planeta

Los cambios abruptos son transiciones climáticas que han dado lugar a modificaciones muy importantes de las condiciones climáticas en zonas muy amplias de nuestro planeta, como por ejemplo, todo el Hemisferio Norte. Al hablar de ellos tenemos que definir en primer lugar qué se entiende por el término “abrupto”. Dicho concepto hay que ponerlo en el contexto de los procesos que determinan el cambio climático general, es decir, los ciclos orbitales de Milankovitch.

Los cambios climáticos regulares

Estos cambios han dado lugar a los periodos glaciares e interglaciares del pasado. Son debidos a las variaciones de insolación que experimenta la Tierra debido a cambios pequeños de trayectoria o de inclinación del eje de rotación por influencia de otros astros presentes en el

sistema planetario, fundamentalmente Júpiter y la Luna. Los ciclos básicos que intervienen en ellos se denominan “de Milankovitch” en recuerdo del serbio Milutin Milankovitch, que fue el primer científico que los formuló como expresión matemática en 1930. Sin embargo, el primer autor que expresó la posibilidad de que los cambios entre épocas glaciares e interglaciares se debieran a la influencia orbital fue James Croll, de la Universidad de Anderson, Glasgow (Escocia). Hay que mencionar que Croll no era catedrático de dicha universidad sino un conserje, que después obtuvo muchos galardones científicos por sus trabajos.

Como es conocido, la trayectoria orbital de la Tierra es elíptica. La excentricidad puede ser más o menos acusada, aproximándose a una circunferencia en el segundo caso. Como consecuencia de este carácter elíptico nuestro planeta a veces se encuentra más cerca o más lejos del sol, siendo el perihelio y el afelio los momentos que corresponden a mayor proximidad o lejanía, respectivamente (figura 5.7). Las variaciones entre una y otra dan lugar a contribuciones diferentes de la cantidad de calor recibida a lo largo del año y ello tiene su efecto en el clima. Los cambios de excentricidad son cíclicos y siguen periodos de 100.000 y 400.000 años.

2. Indica con este término el IPCC que la probabilidad supera el 90%.

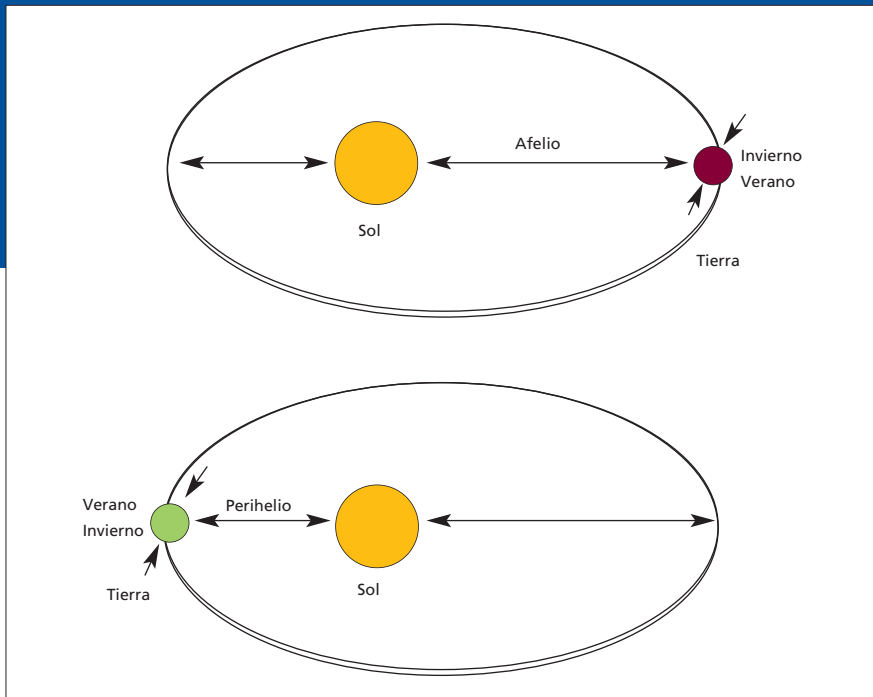


Figura 5.7. Esquema que muestra dos situaciones diferentes con respecto a la precesión. En la parte superior el afelio coincide con el invierno en el Hemisferio Norte y verano en el Hemisferio Sur (situación contraria a la actual). Ello refuerza la estacionalidad en el Hemisferio Norte. En la parte inferior, se muestra la equivalencia al cabo de seis meses. La coincidencia del perihelio con el verano del Hemisferio Norte refuerza la estacionalidad allí. En estos gráficos también se muestra la variación de la inclinación del eje de rotación (oblicuidad) y una situación orbital fuertemente elíptica (excentricidad).

Otra característica orbital de la tierra es la oblicuidad. Como sabemos, la Tierra gira sobre sí misma respecto a un eje que está inclinado con referencia al plano de traslación (figura 5.7). La inclinación es variable, entre $21,5^\circ$ y $24,5^\circ$, en la actualidad $23,5^\circ$. Los cambios de inclinación dan lugar a variaciones estacionales más o menos marcadas, y varían siguiendo unos periodos de 41.000 años.

Otro proceso orbital importante es la precesión, que resulta de la combinación de la excentricidad y los cambios estacionales. El perihelio y el

afelio, actualmente 147 y 152 millones de kilómetros, respectivamente, tienen una relevancia diferente si ocurren en invierno o en verano. Ello es fácil de entender si se considera que en la actualidad el perihelio se produce el 3 de enero y el afelio el 3 de julio. La situación actual es beneficiosa para el Hemisferio Norte porque el planeta se encuentra más cercano o más alejado del sol cuando allí es invierno y verano, respectivamente, lo que amortigua la estacionalidad de estas zonas del planeta. Por el contrario, en el Hemisferio Sur la posición planetaria actual tiende a extremar sus variaciones estacionales. Los cambios de precesión siguen unos periodos de unos 19.000, 22.000 y 24.000 años.

El estudio de los cambios en la composición relativa de los isótopos ^{18}O y ^{16}O en los fósiles de los foraminíferos del fondo del mar mostró que seguían los periodos de Milankovitch antes descritos. Esta coincidencia entre un forzamiento astronómico y un registro del fondo sedimentario marino proporcionó un

alto grado de fiabilidad a dicha teoría astronómica entre la comunidad científica. Se interpretó que los cambios en la composición isotópica del oxígeno reflejaban fundamentalmente las variaciones de volumen de hielo del Hemisferio Norte cuyo origen se debe a una acumulación de agua evaporada y depositada en forma de nieve. En las épocas glaciares, el gran volumen de hielo dio lugar a una gran acumulación de ^{16}O en zonas continentales y, por tanto, dejó los océanos con mayor proporción de ^{18}O .

La combinación de estos tres periodos principales da lugar a efectos de neutralización o reforzamiento, tanto al desplazar el clima hacia procesos de calentamiento o de enfriamiento. Estos procesos orbitales son los que en última instancia han dado lugar a los cambios climáticos entre épocas glaciares e interglaciares. Cada transición representa reordenaciones climáticas que en general se mantienen unos 30.000 o 70.000 años.

En cualquier caso no debe entenderse la relación entre cambios orbitales y climáticos como un fenómeno causa-efecto. Los primeros suponen diferencias de energía solar que son muy pequeñas en comparación con las cantidades de energía que participan en los cambios climáticos observados en la Tierra. Las diferencias de insolación media se amplifican en los numerosos procesos planetarios de



retroalimentación. En este sentido, los gases de efecto invernadero, CO_2 , metano y óxido nitroso, por ejemplo, siguieron estos cambios, encontrándose concentraciones más bajas, 190 ppm, 350 ppb y 200 ppb, respectivamente, en los periodos glaciares y más altas 280 ppm, 715 ppb y 300 ppb, respectivamente, en los interglaciares (Foster *et al.*, 2001).

Así, la influencia de los cambios orbitales en el régimen de veranos

Formas erosivas ocasionadas por el viento de tramontana en el litoral de la costa norte de Menorca.

Fotografía: C. M. Duarte.

frescos es muy importante. Éstos no permiten la fusión de todo el hielo acumulado durante el invierno y así el planeta evoluciona a una glaciación. Este aspecto fue formulado por el ruso-alemán Vladimir Copen y representó una modificación de los mecanismos propuestos por Milankovitch que se centraban en la intensidad y frecuencia de los inviernos muy duros. En cualquier caso, todavía existen muchas incertidumbres al intentar conocer los mecanismos que participan en la correspondencia astronómico-orbital.

Los cambios abruptos

Se entiende por cambios abruptos aquellos que ocurren en intervalos menores a estos ciclos, usualmente comprenden periodos de 1.000 a 5.000 años. Dichos cambios suponen intervalos de tiempo menores que los orbitales pero aún así se trata de periodos climáticos muy largos si se contemplan a escala humana. Hay que destacar que su mayor brevedad relativa no implica que su intensidad sea menor en comparación con las variaciones climáticas asociadas a las transiciones orbitales. Los cambios abruptos pueden ser de menor, semejante o mayor intensidad que los cambios entre épocas glaciares e interglaciares.

Dichos cambios abruptos fueron algo muy frecuente en el último periodo glaciario, entre los últimos 20.000 y 70.000 años. Existieron unos seis

episodios de fuertes fríos y duración del orden de 5.000 años en los que se produjo una fusión muy importante de hielos provenientes de icebergs en toda una franja entre 40 y 55°N del océano Atlántico. Estos intervalos se conocen por el nombre de su descubridor, Heinrich. Durante ellos las aguas del Atlántico alcanzaron las temperaturas más bajas características de la época glaciaria (figura 5.8).

Otro tipo de fenómenos abruptos que también se produjeron en esta época glaciaria tuvieron una duración más corta (en el orden de 1.000-2.000 años, a veces 250 años) y no fueron acompañados de procesos masivos de fusión de hielo. Este segundo tipo se conocen como episodios Dansgaard-Oeschger, debido al nombre de sus descubridores. A pesar de su duración menor, las caídas de temperatura que los caracterizaron son a menudo de la misma intensidad que los episodios de Heinrich. De hecho, existe una correspondencia profunda entre ambos, existiendo varios episodios cortos Dansgaard-Oeschger entre cada Heinrich (figura 5.8).

La última época glaciaria estuvo por tanto puntuada por numerosos episodios climáticos abruptos que dieron lugar a oscilaciones de temperatura del agua de mar de hasta 6°C en intervalos de 1.000 años. En la zona continental, éstos dieron lugar a cambios enormes de vegetación. Por





Estrecho de Fram, océano Glaciar Ártico.
Fotografía: M. Elviro.

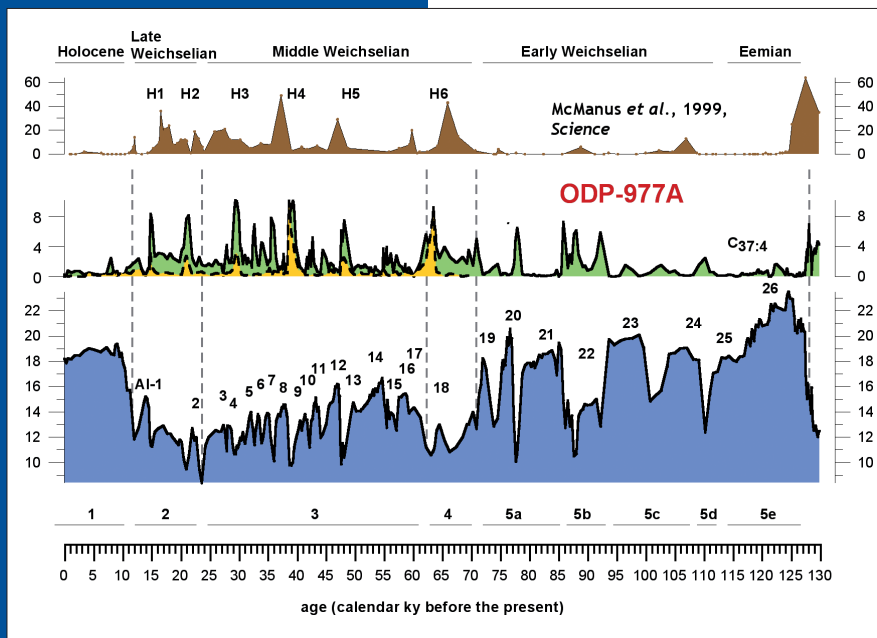


Figura 5.8. Registro de temperaturas a partir de la distribución de alquenonas de 37 átomos de carbono (parte inferior) en el testigo ODP-977 del Mar de Alborán (Martrat *et al.*, 2004). En él se pueden observar los episodios abruptos de Heinrich y Dansgaard-Oeschger. Dichos episodios concuerdan con sucesos de descarga de aportes detríticos ocurridos en el Atlántico Norte (parte superior; testigo ODP-980). El registro de en medio muestra los incrementos de cetonas tetrainsaturadas durante los episodios abruptos antes mencionados, lo cual también pone de manifiesto la presencia de episodios fríos.

ejemplo, en la Península Ibérica se pasó de un dominio de bosques en las épocas cálidas a un dominio de estepa en las épocas frías. Sin embargo, hay que mencionar que la extensión geográfica de los cambios comprendió todo el Hemisferio Norte, por lo menos.

Durante la época glaciaria, la circulación termohalina no funcionaba o tenía una intensidad muy disminuida. Es decir, que la formación de Agua Atlántica Profunda (NADW) era muy escasa y que la Corriente del Golfo estaba limitada a un circuito de baja latitud. Clásicamente se ha considerado que en ausencia del mecanismo

estabilizador de dicha corriente la generación de oscilaciones climáticas abruptas era más sencilla.

Sin embargo, también se produjeron episodios de enfriamiento abrupto en la época interglaciaria, cuando la corriente del Golfo funcionaba de modo vigoroso. Hubo menos transiciones abruptas pero las que se produjeron fueron más intensas que las de la época glaciaria, observándose cambios de hasta 10°C en intervalos de 1.000 años (figura 5.8). Las transiciones abruptas de la época interglaciaria comprendieron intervalos del orden de 1.000-2.000 años.

Otro aspecto importante que hay que mencionar es el de su frecuencia. Estudios recientes a alta resolución a lo largo de los últimos 420.000 años (Martrat *et al.*, 2004; 2007) han mostrado que dichos cambios han ido aumentando de frecuencia a medida que nos acercamos a los tiempos presentes. Ello se observa tanto en los periodos glaciarios como en los interglaciarios. Así, el número de transiciones abruptas del último ciclo climático (últimos 130.000 años) fue de 18, fueron 9 en el penúltimo (130.000-245.000 años antes del presente), 7 en el antepenúltimo (245.000-345.000 años) y 6 en el anterior a éste (345.000-450.000 años). En todos los ciclos, se observan más transiciones abruptas en los periodos glaciarios que en los interglaciarios (Martrat *et al.*, 2004;

2007). En general estos cambios abruptos interrumpen la continuidad que sería esperable después de cada paso de época glaciaria a interglaciaria y viceversa. Son mucho más frecuentes que los cambios derivados de los ciclos de Milankovitch.

Las causas de los cambios abruptos

No se conoce una razón clara para la mayor recurrencia de cambios abruptos en los tiempos recientes. A nivel orbital el planeta seguía una trayectoria más elíptica hace 400.000 años que ahora. Es posible que el grado de excentricidad de la elipse influya en la mayor o menor frecuencia de estos cambios pero se desconoce la razón específica que puede haber detrás de ello. Hay que señalar que la relación con el ciclo de 400.000 años se basa en muy poca información disponible ya que a alta resolución únicamente se dispone de registros sedimentarios marinos que cubran este intervalo de tiempo en el Margen Ibérico (Martrat *et al.*, 2007) y Atlántico noroeste (McManus *et al.*, 1999). Es necesario, por tanto, realizar muchos más estudios a alta resolución para asegurar si se trata de una tendencia general.

Dado que el establecimiento de la causa astronómica constituye uno de los mayores éxitos científicos del conocimiento de la evolución climática de nuestro planeta, se han hecho muchos esfuerzos para relacionar la

incidencia de los cambios abruptos con cambios de insolación, en este caso de periodos más cortos que los orbitales.

El investigador que planteó esta posibilidad con apoyo de datos experimentales fue Gerald Bond, de la Universidad de Columbia (USA). Sus datos justificaban que dichas variaciones abruptas seguían un periodo de 1.470 años \pm 500 años tanto en el último periodo glaciario como en el Holoceno, es decir, los últimos 70.000 años (Bond *et al.*, 1997). El origen astronómico de dichos ciclos no estaba claro, incluso se ha dudado acerca de si los mismos no pueden reflejar artefactos relacionados con la periodicidad del muestreo o con limitaciones de la escala de edades del radiocarbono (^{14}C) que se usa para datar. Actualmente éste es un tema abierto dentro de las ciencias paleoclimáticas. En cualquier caso, los resultados de Martrat *et al.* (2007) dejan claro que esta periodicidad, si existió, sólo fue observable en un periodo breve, entre los últimos 15.000 y 70.000 años. No se trata, por tanto, de una característica general de los cambios abruptos.

Tal como se ha indicado anteriormente, los cambios abruptos coincidieron con interrupciones de la circulación termohalina, fundamentalmente en lo que se refiere a modificaciones de la circulación de giro meridional (MOC) y de la formación de NADW. Ello explica que sean más

frecuentes en las épocas glaciarias que en las interglaciarias. De hecho, se ha planteado que, entre los ocurridos en el último periodo glaciario, los de menor intensidad, los episodios Dansgaard-Oeschger, correspondieron a disminuciones en las tasas de formación de agua oceánica profunda y desplazamientos de la corriente del Golfo a latitudes más bajas, y que los de mayor intensidad, los episodios de Heinrich, correspondieron a interrupciones totales de dicha circulación (Ganopolski and Rahmstorf, 2001).

Durante estos episodios de cambio más intenso (Heinrich), las zonas de mayor latitud del Hemisferio Sur se calentaron (Blunier and Brook, 2001). Este comportamiento asimétrico, de balancín, es uno de los aspectos que últimamente han sorprendido más a los investigadores en paleoclimatología y sólo se ha podido poner de manifiesto al comparar registros a alta resolución, en este caso de los hielos de la Antártica y de Groenlandia. Dicha asimetría comprende un *decalage* del orden de 1.500-3.000 años que no es fácil de observar cuando se comparan registros de ambos hemisferios debido a las incertidumbres de datación. La descripción del efecto balancín se basó en la correlación de los registros de metano de hielos árticos y antárticos, suponiendo que la concentración de este gas en la atmósfera del planeta se



Playa de Es Cargol (Mallorca).

Fotografía: C. M. Duarte.

homogeneizaba a escala planetaria en intervalos de tiempo cortos.

Los testigos del Margen Ibérico mostraron que este *decalage* es real al comparar la composición isotópica de ^{18}O y ^{16}O en esqueletos de foraminíferos béticos y planctónicos, que representaban aguas profundas y superficiales, respectivamente [Shackleton *et al* (2000) para el último periodo glacial y Martrat *et al.* (2007) para los últimos 420.000 años]. Además, el estudio de Martrat *et al.* (2007) muestra que se produce una entrada de aguas profundas provenientes de la Antártica a latitudes

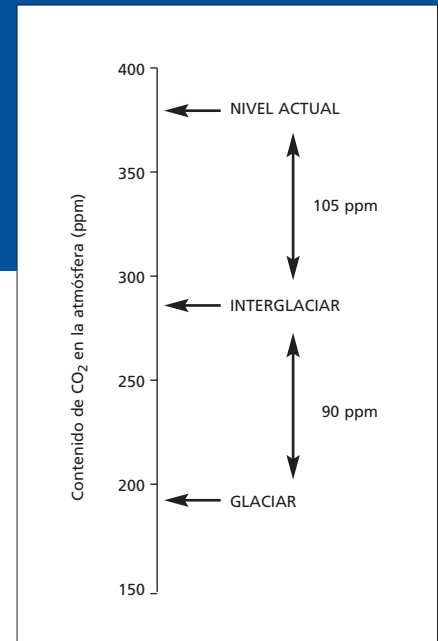
del océano Atlántico del orden de 40°N . Ello ocurre previamente al desarrollo de los cambios abruptos, tanto los desarrollados en épocas glaciares como interglaciares. Es decir, que el mecanismo del balancín interviene en la generación de los cambios abruptos. Aunque éstos se observen como fenómenos de gran intensidad en el Hemisferio Norte, comprendiendo un enfriamiento fuerte seguido de un calentamiento intenso al cabo de un cierto tiempo (250-5.000 años), vienen precedidos por calentamientos en el Hemisferio Sur (aunque de menor intensidad, según indican los registros de hielo).

Las observaciones indicadas son importantes para entender los mecanismos climáticos que intervienen en los cambios abruptos. En concreto, las interacciones interhemisféricas abren una perspectiva muy interesante en relación a la comprensión de los fenómenos que los determinan. Sin embargo, la causa motriz que pone en marcha el proceso y lo revierte a condiciones iniciales sigue siendo desconocida.

Los cambios abruptos en tiempos presentes

El estudio de los registros del Margen Ibérico (Martrat *et al.*, 2007) muestran que en las épocas interglaciares, los cambios abruptos ocurrieron después de periodos largos de estabilidad climática. Éste es un fenómeno recurrente que permite predecir que el Holoceno, el interglacial actual, muy probablemente experimentará un cambio abrupto en el futuro. En este sentido, se tienen que usar “muy probablemente” y no “inevitablemente” debido a la posible influencia de la actividad humana sobre el clima.

Figura 5.9. Contenido de CO₂ en la atmósfera en la actualidad y contenido medio en las épocas glaciares e interglaciares del Cuaternario.



La incógnita esencial es el “cuándo”. El registro de los últimos periodos interglaciares no nos permite anticipar ninguna fecha. Podría ocurrir dentro de 1.000 o 5.000 años, o dentro de una fecha posterior. Hoy por hoy no hay datos que permitan preverlo.

En cualquier caso, existe un consenso general entre la comunidad científica acerca de que la generación de los cambios abruptos pasa por desestabilizaciones de la circulación termohalina. Actualmente se observa la fusión extensiva de los hielos del ártico, que con gran probabilidad está asociada al calentamiento general del planeta debido a la acción humana. Ésta puede dar lugar a desestabilizaciones de la circulación termohalina. Hay que recordar que aunque esta circulación se representa mediante unos flujos de corriente que recuerdan una cinta transportadora, el mecanismo real de formación de agua atlántica profunda es estacional, interrumpiéndose en verano cuando la densidad del agua baja al aumentar la temperatura.

No hay mucha información acerca del “estado de salud” de la circulación termohalina actual. Es difícil disponer de datos comparativos que permitan conocer la intensidad del flujo de formación en el pasado para poder comparar con los datos presentes. En un estudio de la intensidad de corriente de aguas profundas en el Banco de Faroe entre 1950 y 1998 se observó un descenso del flujo del 20% (Hansen *et al.*, 2001). De todos modos, no está claro si estos datos son representativos del comportamiento general de la producción de NADW. Otros estudios publicados en revistas de amplia difusión no han dado lugar a resultados concluyentes ya que han sido revisados y descartados por sus mismos autores.

La fusión extensiva de los hielos del Polo Norte y Groenlandia constituye un toque de atención en este sentido. Afortunadamente el proceso se produce en verano, cuando la formación de NADW se encuentra interrumpida de forma natural. En invierno se reconstituye la cubierta de hielo continental y polar y la formación de

NADW. Sin embargo, cabe pensar en lo que puede ocurrir en el caso que la disminución de salinidad del agua ártica se alargue algunos meses más. No obstante, incluso en la circunstancia de alteraciones del funcionamiento de la circulación termohalina, tampoco es fácil predecir cuál va a ser la evolución climática. No se puede extrapolar directamente lo ocurrido en el pasado porque ahora nos encontramos en una situación radicalmente diferente por los niveles inusualmente altos de CO₂ en la atmósfera.

Tal como se muestra en la figura 5.9, los humanos hemos sacado al CO₂ de escala. En la actualidad este gas se

	Última desglaciación	Cambio abrupto	Presente
CO ₂ ppm/año	0.0045-0.009	0.001	1.4 (1.9) ^a
Temperatura °C/década	0.026	0.05-0.1	0.004-0.02

Tabla 5.3. Velocidades de cambio del CO₂ y de la temperatura oceánica superficial en periodos de cambio climático rápido.

^a Última década

encuentra en concentraciones de 385 ppm, que están fuera del intervalo en el que osciló este gas a lo largo de las últimas épocas glaciares e interglaciares. Lo mismo ocurre para las concentraciones de metano y óxido nítrico, 1780 ppb y 320 ppb, respectivamente (Foster *et al.*, 2001). Además, la diferencia de CO₂ entre 280 ppm (concentración natural del holoceno) y el nivel actual ya es superior a la correspondiente al paso de época glacial a interglacial. En el caso del metano, la diferencia entre 715 ppb y el nivel actual prácticamente triplica el incremento de paso de glacial a interglacial. Todo ello da lugar a una fuerte incertidumbre sobre hacia dónde puede evolucionar nuestro clima en la época actual pero es evidente que dicha tendencia apunta a un calentamiento general, como ya se está observando y en coherencia con el forzamiento radiativo que representan estos gases de efecto invernadero.

Para acabar de describir el problema hay que centrar la atención en la tabla 5.3. Allí se muestra que el incremento en la concentración de CO₂, el gas principal de efecto invernadero, es del

orden de 1.400 veces más rápido (o 1.900 veces si se compara con el incremento de la última década) que cuando este gas aumentó más rápidamente de forma natural. En realidad, si bien antes las concentraciones de los gases de efecto invernadero variaban siguiendo el cambio ahora han tomado la delantera, lo cual representa otro factor de incertidumbre para calcular los efectos de su incremento. En cualquier caso, podemos afirmar que los humanos estamos cambiando el clima y que estamos conduciendo este proceso con el acelerador apretado a fondo.

5.5. Impacto del cambio global sobre las zonas polares del planeta

Hace escasamente un siglo, los más curtidos exploradores pugnaban por llegar a los Polos, las zonas más recónditas del planeta, perdiendo en muchos casos su vida en el empeño. Tras un siglo escaso de la llegada del primer ser humano a los polos geográficos en expediciones lideradas por el noruego Roald Amundsen (Polo Sur, 1911; Polo Norte, 1926), estas regiones remotas de nuestro planeta están situadas en primera línea de la batalla contra el frente climático, ¿por qué?, muy sencillo, porque estas áreas heladas del planeta son las que con mayor claridad están

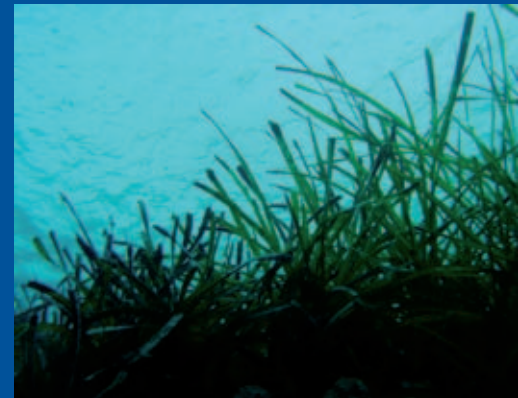
alertándonos de los cambios cada vez más rápidos e intensos que el clima del planeta está experimentando y porque estas señales no se quedan en simples avisos para navegantes, sino que los cambios que están teniendo lugar en estos confines opuestos del planeta Tierra pueden tener repercusiones globales. Las amenazas sobre las zonas polares son particularmente preocupantes porque estas regiones tienen una importancia fundamental en el sistema Tierra, interviniendo en la circulación de la atmósfera y el océano, la regulación del clima del planeta, y como componentes esenciales de sus ecosistemas.

Los ecosistemas polares están experimentando un notable calentamiento, que es particularmente espectacular en el caso del Ártico donde la pérdida de hielo es rápida (Vinnikov *et al.*, 1999; Serreze *et al.*, 2007) y parece estar acelerando hasta el punto de plantear un escenario plausible de un océano Ártico desprovisto de cobertura de hielo en verano en un futuro cercano (Serreze *et al.*, 2007). La pérdida de masas de hielo marino y el calentamiento son también notables en la Península Antártica (Rignot *et al.*, 2004), aunque estas pérdidas sean mucho menos notables y más localizadas que en el Ártico. Sin embargo, resultados recientes convergen en señalar que la Antártida se está calentando más rápidamente de lo que se pensaba y que este calentamiento está también comenzando a fundir

grandes masas de hielo en el continente antártico.

Estas señales han podido ser recogidas, en parte, gracias al IV Año Polar Internacional, que entre marzo de 2007 y marzo de 2009 ha movilizado una intensa actividad investigadora para evaluar el estado de las zonas polares del planeta. El IV Año Polar Internacional (www.ipy.org y www.api.es para la página española) fue promovido por el Consejo Científico Internacional y la Organización Meteorológica Mundial, con la peculiaridad de que el año polar internacional 2007-2009 no se llevó a cabo motivado por la necesidad de explorar las regiones polares, como fue el caso de las ediciones previas, sino por la necesidad de investigar los impactos y rápidos cambios que los sistemas polares están experimentando. El Año Polar Internacional ha desarrollado más de 200 proyectos movilizando para ello miles de científicos de 60 países. El goteo de datos alimenta, cada vez más claramente, la hipótesis de que la fusión del hielo polar se ha acelerado de forma clara:

- Entre enero y marzo de 2002 se desprendió la inmensa Placa Larsen B de la Península Antártida... parecía un hecho aislado.
- En el verano de 2007 tuvo lugar una pérdida de hielo permanente del Ártico que, en tan sólo dos meses, supuso la pérdida de una cuarta parte de la extensión





Caimán en Silver Springs (Florida, EE.UU.).
Fotografía: C. M. Duarte.

remanente. Investigadores a bordo del buque *Hespérides*, trabajando en la zona en julio de 2007, observaron la fusión del frente de hielo permanente a un ritmo de 18 km por día. Semanas más tarde un submarino ruso plantó una bandera a 4.000 m de profundidad en el océano Ártico. Rusia reivindica una enorme ampliación de su zona económica exclusiva sobre el Ártico.

- En 2008 se publicaron resultados que apuntaban a que la fusión del hielo de Groenlandia se había acelerado, con la sorpresa de que esta

fusión no se daba tanto en las capas superficiales, sino que se daba por el interior de la placa de hielo. La escorrentía, la cantidad de agua dulce que se vierte desde Groenlandia, al océano había aumentado un 50%. Profundas simas aparecían en la placa de hielo de Groenlandia que engullían grandes ríos de agua de fusión en verano. En septiembre de 2008 investigadores de la NASA arrojaron 90 patitos de goma y un registrador de posición por el sistema GPS por una de estas simas, la del glaciar

Jakobshavn, en la bahía de Baffin, en un intento de averiguar el lugar al que descargaba esta agua. Un artículo científico, publicado en los *Proceedings of the National Academy of Sciences*, de EE.UU. (Lenton *et al.*, 2008), alerta sobre el impacto de la pérdida de hielo en forma de posibles cambios abruptos en el clima de la Tierra, que los cambios en las zonas polares podrían poner en movimiento.

- En la primavera de 2008 el Consejo de Europa convoca a sus miembros para debatir los riesgos geopolíticos y para la seguridad del deshielo del Ártico, casi al mismo tiempo los países ribereños se reúnen en Groenlandia para acordar entre ellos el reparto de las aguas internacionales del Ártico, con sus recursos, en el mapa que emerge de esa reunión las aguas internacionales quedan reducidas a menos de un 10% de su extensión actual.
- En el verano de 2008 abundan informes de osos polares nadando en zonas alejadas de las placas de

Simulando escenarios futuros de sequía en el bosque lluvioso de la estación biológica Senda Darwin (Chiloe, Chile).

Fotografía: F. Valladares.



hielo más cercanas, en el sector del pacífico del Ártico y en el del Atlántico. Dos osos polares son abatidos en el plazo de pocas semanas tras llegar, agotados, a Islandia, a cientos de kilómetros de su área geográfica.

- A finales del verano de 2008 una expedición sueca y rusa alerta de la aparición de grandes burbujas de gas metano, un gas de efecto invernadero 20 veces más potente que el CO₂, en la plataforma marina de Siberia: los hidratos de metano en las plataformas continentales del Ártico amenazan con liberarse a la atmósfera por el deshielo de las celdas de hielo en que se encuentra retenido este gas desde la última glaciación.
- A finales de 2008 la Unión Europea negocia una ampliación de la cuota pesquera en los caladeros de las islas Svalbard, en el Ártico. La explotación de los recursos del Ártico aumenta.
- En enero de 2009 un artículo publicado en la revista *Nature* revisa

los datos sobre calentamiento de la Antártida y advierte de que toda la mitad occidental se está calentando y que el calentamiento del continente blanco es más rápido y más generalizado de lo que se pensaba. En enero de 2009 se dan a conocer observaciones que apuntan a que la placa de hielo Wilkins, de 14.000 km², en la Península Antártica, se ha agrietado y está inestable. Dos semanas más tarde, investigadores del CSIC a bordo del buque de investigación *Hespérides* observan cómo la placa se ha fragmentando, en su porción más exterior, en enormes icebergs. La rápida fusión —más de 500 km en dos semanas— de la banquisa de hielo del mar de Belinghausen permite que estos hielos puedan dispersarse.

- En febrero de 2009 se publica, en la revista *Proceedings of the National*

Academy of Sciences, de EE.UU. un artículo (Smith *et al.*, 2009) que presenta un gráfico vetado —por razones políticas— del último informe del IPCC y se explica, en las notas al pie de página, cómo las delegaciones de algunos países presionaron, por razones de conveniencia, para que se suprimiera esta información que parecía inconvenientemente alarmante.

- En marzo de 2009 la organización de Año Polar Internacional destaca, a través de una nota de prensa, que resultados preliminares convergen a apuntar que el deshielo de las zonas polares del planeta es más intenso de lo que se pensaba. Una semana más tarde, los científicos reunidos en la Conferencia del Clima que se celebraba en Copenhague revisan al alza, duplicándola, la tasa de aumento del nivel del mar, debido sobre todo a



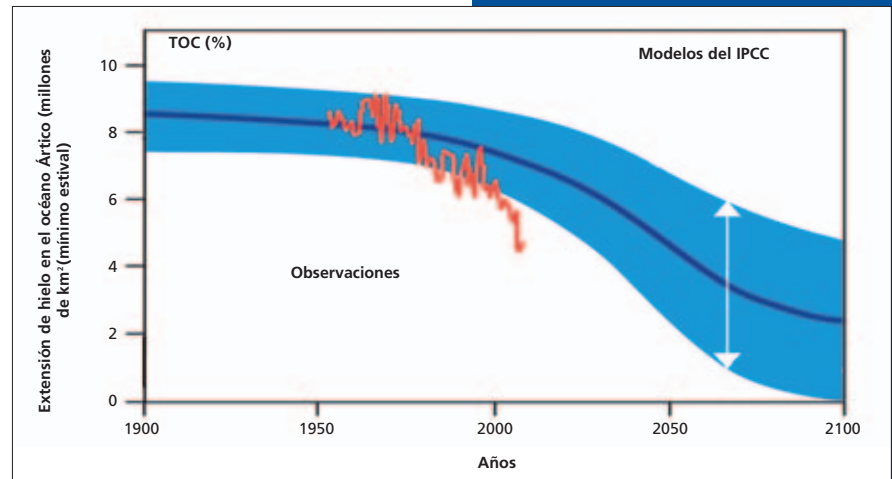
La costa norte de Menorca desde el faro
Cavallería.

Fotografía: C. M. Duarte.

una mayor contribución del agua de deshielo de la anticipada.

Los modelos publicados por el IPCC en octubre de 2007 sobre la evolución de la extensión de hielo en el Ártico fracasan estrepitosamente. La pérdida abrupta de hielo que tuvo lugar en el verano de 2007 sitúa la extensión mínima de hielo en el océano Glaciar Ártico en los valores que se predecían para el año 2060, por debajo de los márgenes de incertidumbre del modelo publicado ese mismo año (figura 5.10). Todo apunta a que los informes que el IPCC —organización que ha recibido el Nobel de la Paz pero que quizá no se haga acreedora del de Ciencia— publicó en 2007 fueron en exceso optimistas.

La pérdida de hielo en las regiones polares puede alterar las corrientes marinas, al descargar grandes cantidades de agua dulce que afectan a la densidad de las masas de agua y, por tanto, a su circulación. También afecta al nivel del mar, que hasta ahora aumentaba más por la expansión térmica derivada de la disminución de la densidad del agua con el calentamiento del océano que por los aportes de agua de deshielo, pero en el que el aumento del deshielo jugará un papel cada vez más importante. Es importante señalar que la fusión del hielo que flota en el mar no contribuye al aumento del nivel del mar, pero que su pérdida puede acelerar la descarga de hielos continentales, cuyo



deshielo sí contribuye al aumento del nivel del mar. La pérdida de hielo también afectará al balance radiativo del planeta, pues mientras que el hielo refleja el 90% de la radiación incidente, el agua líquida absorbe el 60%, aumentando el flujo de calor al océano.

La pérdida de hielo de las zonas polares también tiene consecuencias socioeconómicas y geopolíticas importantes. Las plataformas del océano Glaciar Ártico contienen una parte importante, casi una cuarta parte, de las reservas mundiales de gas y petróleo, cuya extracción se ve facilitada por la reducción de la cubierta de hielo que las recubría. La pérdida de hielo también facilita la explotación pesquera y la navegación, acortando la distancia, y coste, de navegación entre Asia y Europa. La pérdida de hielo impulsará

Figura 5.10. Comparación entre la disminución en la extensión mínima anual de hielo en el Ártico prevista por los modelos del IPCC (línea azul, con margen de incertidumbre mostrado como zona sombreada en azul) y las observaciones (trazo en color rojo).

Fuente: Stroeve et al. (2007).

el aumento de la actividad humana sobre las zonas polares del planeta, zonas que son particularmente vulnerables frente a los riesgos de impactos asociados a un aumento de la actividad humana.

Las pérdidas de hielo en las regiones polares tienen importantes consecuencias climáticas y geopolíticas, pero suponen, a la vez, una pérdida del “hábitat”, la superficie de hielo de los océanos polares, que representa la característica diferencial de estos ecosistemas (Duarte, 2007). Este hábitat es crítico para un gran número de especies, incluyendo osos polares, focas y morsas en el Ártico y krill, focas y pingüinos en la Antártida. Los importantes impactos que estas pérdidas tendrán sobre los ecosistemas están aún por resolver pero afectarán de forma trascendental a la abundante e importante megafauna que todavía albergan estos ecosistemas.

La problemática de las zonas polares del planeta no se ciñe exclusivamente a los impactos del cambio climático, sino que

responde a la dinámica, más compleja, de cambio global. Como ya hemos visto, el uso de CFCs en la industria de la refrigeración llevó a la reducción de la concentración de ozono, creando el llamado agujero de ozono sobre la Antártida, que conlleva una exposición a niveles de radiación ultravioleta mucho más intensa en el Hemisferio Sur que en el Hemisferio Norte. Igualmente, la caza de ballenas ha tenido un impacto muy importante en el Hemisferio Sur, cuyas consecuencias sobre el ecosistema Antártico podrían ser más profundas de lo que se había pensado (Smetacek, 2007).

El hielo que se funde en el Ártico libera al océano cantidades ingentes de contaminantes (metales, pesticidas y otros), acumulados en estos hielos, que hacen del océano Glaciar Ártico uno de los ecosistemas más contaminados del planeta, a pesar de que las actividades que producen estos contaminantes se encuentran alejadas. Como podemos ver en esta obra, los contaminantes

persistentes que la actividad humana emite a la atmósfera son transportados hasta alcanzar las zonas más remotas del planeta. Se acumulan, en particular, en las zonas frías, como el hielo del Ártico. La contaminación se amplifica a medidas que ascendemos en la cadena trófica, hasta el punto de que los inuit, pueblo eminentemente cazador, tienen niveles de contaminantes tan elevados que la Organización Mundial de la Salud recomienda que sus mujeres no den el pecho a sus bebés. De hecho el pueblo inuit ve en el cambio climático una amenaza para su cultura milenaria. Se trata de un pueblo sin nación, que no tiene voz en las negociaciones de la convención del Clima, pero sí mucho que perder y mucho que decir.

Comprender y predecir los impactos del cambio global sobre las zonas polares del planeta es una cuestión urgente, que solamente se puede abordar a través del esfuerzo coordinado de la comunidad científica internacional.

Referencias

- BLUNIER, T. y BROOK E. J. (2001). “Timing of Millennial-Scale Climate Change in Antarctica and Greenland During the Last Glacial Period”. *Science*, 291, 109-112.
- BOND, G.; SHOWERS, W.; CHESSEBY, M.; LOTTI, R.; ALMASI, P.; DEMENOCAL, P.; PRIORE, P.; CULLEN, H.; HAJDAS, I Y BONANI, G. (1997). “A pervasive millennial-scale cycle in north Atlantic holocene and glacial climates”. *Science*, 278, 1257-1266.
- DUARTE, C. M. (2007). *Impactos del calentamiento global sobre los ecosistemas polares*. Fundación BBVA, Madrid. 186 pp.
- FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D. W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D. C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULZ, M. Y VAN DORLAND, R. (2007). “Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing”. En: Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor, M. y Miller, H. L. (eds.). *Climate Change*

- 2007: *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- GANOPOLSKI, A. y RAHMSTORF, S. (2001). "Rapid changes of glacial climate simulated in a coupled climate model". *Nature*, 409, 153-158.
- HANSEN, B.; TURRELL, W. R. Y ØSTERHUS, S. (2001). "Decreasing overflow from the Nordic seas into the Atlantic Ocean through the Faroe Bank channel since 1950". *Nature*, 411, 927-930.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 3 vols.
- LENTON, T. M.; HELD, H.; KRIEGLER, E.; HALL, J. W.; LUCHT, W.; RAHMSTORF, S., Y SCHELLNHUBER, H. J. (2008). "Tipping elements in the Earth's climate system". *PNAS*, 105: 1786-1793.
- MARTRAT, B.; GRIMALT, J. O.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, C.; CACHO, I.; SIERRO, F. J.; FLORES, J. A.; ZAHN, R.; CANALS, M.; CURTIS, J. H. Y HODELL, D. A. (2004). "Abrupt temperature changes in the western Mediterranean over the past 250,000 years". *Science*, 306, 1762-1765.
- MARTRAT, B.; GRIMALT, J. O.; SHACKLETON, N. J.; ABREU, L. DE; HUTTERLI, M. A. Y STOCKER, T. F. (2007). "Four climate cycles of recurring deep and surface water destabilizations on the Iberian Margin". *Science*, 317, 502-507 (2007).
- MCGUFFIE, K. y A. HENDERSON-SELLERS (2005). "A climate modelling primer". Wiley. 280 pp.
- MCMANUS, J. F.; OPPO, D. W. Y CULLEN, J. L. (1999). "A 0.5-million-year record of millennial-scale climate variability in the north Atlantic". *Science*, 283, 971-975.
- METZ, B.; DAVIDSON, O.; CONINCK, H. DE; LOOS, M. Y MEYER, L. (2005). *La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Resumen para responsables de políticas*. Informe del Grupo de trabajo III del IPCC. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático. ISBN 92-9169-319-7.
- MMA (2005). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*, J. M. Moreno (ed.), Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Castilla-La Mancha. 822 pp.
- NERC (2005). "Climate Change. Scientific certainties and uncertainties". *Natural Environment Research Council*, UK. 6 pp.
- RIGNOT, E.; CASASSA, G.; GOGINENI, P.; KRABILL, W.; RIVERA, A. Y THOMAS, R. (2004). "Accelerated ice discharge from the Antarctic Peninsula following the collapse of the Larsen B ice shelf". *Geophys. Res. Lett.*, 31, L18401, doi:10.1029/2004GL020697.
- RIVERA, A. (2000). *El cambio climático: el calentamiento de la Tierra*. Temas de Debate, Madrid. 270 pp.
- SERREZE, M. C.; HOLLAND M. M.; STROEVE, J. (2007). "Perspectives on the Arctic's Shrinking Sea-Ice Cover". *Science*, 315: 1533-1536.
- SHACKLETON, N. J.; HALL, M. A. Y VINCENT, E. (2000). "Phase relationships between millennial-scale events 64,000-24,000 years ago". *Paleoceanography* 15, 565-569.
- SMETACEK, V. (2007). "¿Es el deslice del krill antártico resultado del calentamiento global o del exterminio de las ballenas?". En: Duarte, C. M. (ed.), *Impactos del calentamiento global sobre los ecosistemas polares*. Fundación BBVA, Madrid, pp. 45-82.
- SMITH, J. B.; SCHNEIDER, S. H.; OPPENHEIMER, M.; YOHEE, G. W.; HAREF, W.; MASTRANDREAC, M. D.; PATWARDHAN, A.; BURTON, I.; CORFEE-MORLOT, J.; MAGADZA, C. H. D.; FÜSSEL, H. M.; PITTOCK, A. B.; RAHMAN, A.; SUÁREZ, A. Y YPERSELE, J. P. VAN (2009). "Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 'reasons for concern'". *PNAS*, 106: 4133-4137.
- STROEVE, J.; HOLLAND, M. M.; MEIER, W.; SCAMBOS, T. Y SERREZE, M. (2007). "Arctic sea ice decline: Faster than forecast. Geophysical". *Res. Letters* 34, L09501, doi: 10.1029/2007GL029703
- VINNIKOV, K. Y.; ROBOCK, A.; STOUFFER, R. J.; WALSH, J. E.; PARKINSON, C.L.; CAVALIERI, D. J.; MITCHELL, J. F. B.; GARRETT, D. Y ZAKHAROV, V.F. (1999). "Global warming and Northern Hemisphere sea ice extent". *Science*, 286: 1934-1937.
- WONG, C. S. Y HIRAIR, S. (1997). *Ocean Storage of Carbon Dioxide. A Review of Oceanic Carbonate and CO₂ Hydrate Chemistry*. IEA Greenhouse Gas R&D Programme. ISBN 1-898373-09-4.



Embarcación en aguas de Formentera.

Fotografía: C. M. Duarte.

6. Escenarios de cambio global

6.1. Escenarios climáticos

Para realizar simulaciones del clima presente las condiciones de trabajo son perfectamente conocidas. En concreto, se sabe cómo ha ido evolucionando la composición atmosférica (incluidos aerosoles) en el transcurso del tiempo. Sin embargo, la situación es muy diferente si se quiere proyectar el clima hacia el futuro partiendo de las condiciones presentes. No se conoce, a priori, qué va a ocurrir con el contenido en la atmósfera de gases con efecto invernadero y aerosoles.

El problema no es fácil pues las emisiones dependen de muchos factores. Por ejemplo, la evolución de la población mundial, de los sistemas socioeconómicos, el uso de tecnologías respetuosas con el medio ambiente, la aparición de nuevas tecnologías,

la aplicación de los acuerdos internacionales sobre limitación de emisiones, la evolución de la situación geopolítica global, etc. Para resolver el problema se hacen hipótesis sobre la evolución de las emisiones, que reciben el nombre de escenarios de emisiones. El IPCC ha introducido dos generaciones de escenarios. Los primeros en 1990 y 1992, llamados IS92, que se han venido utilizando hasta el final del siglo pasado. En 2000 publicó, en el *Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones*, la segunda generación, denominados escenarios SRES. Los escenarios están agrupados en cuatro líneas evolutivas (A1, A2, B1 y B2) condicionadas por “fuerzas” como población, economía, tecnología, energía, agricultura y usos del suelo. En A1 y A2 se da más peso al crecimiento económico mientras que en B1 y B2

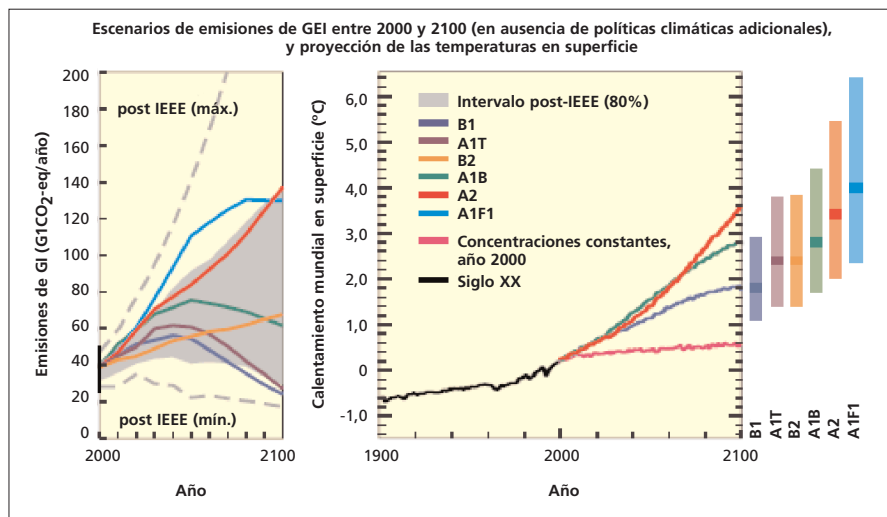


Figura 6.1. Panel izquierdo: emisiones mundiales de GEI (CO₂-eq) en ausencia de políticas climáticas: seis escenarios SRES ilustrativos (líneas de color), junto con el percentil del 80% de escenarios recientes publicados desde el SRES (post SRES) (área sombreada en gris). Las bandas de color a la derecha representan la totalidad de los escenarios post IEEE. Las emisiones abarcan los gases CO₂, CH₄, N₂O y F. Panel derecho: las líneas continuas representan promedios mundiales multimodelo del calentamiento en superficie para los escenarios A2, A1B y B1, representados como continuación de las simulaciones del siglo XX. Estas proyecciones reflejan también las emisiones de GEI y aerosoles de corta permanencia. La línea rosa no es un escenario, sino que corresponde a simulaciones en que las concentraciones atmosféricas se mantienen constantes en los valores del año 2000. Las barras de la derecha indican la estimación óptima (línea gruesa dentro de cada barra) y el intervalo probable evaluado para los seis escenarios SRES considerados en el periodo 2090-2099. Todas las temperaturas son anomalías respecto del periodo 1980-1999.

Fuente: IPCC 2007.

predominan los aspectos ambientales. Por otra parte en A1 y B1 se tiende a un mundo globalizado, en tanto que en A2 y B2 se enfatiza en soluciones regionales y locales. Cada una de estas líneas da lugar a diferentes escenarios, hasta completar un total de 40. Normalmente se utilizan familias, coincidentes en nombre con las líneas,

con excepción del A1 que se desglosa en tres:

- A1FI, con uso intensivo de combustibles fósiles,
- A1T, con uso de fuentes de energía no fósil,
- A1B, con uso equilibrado de diferentes fuentes.

Todas ellas son posibles, y no se realiza sobre ellas ningún tipo de priorización ni juicio de plausibilidad. Es evidente que no se sabe cómo va a ser la realidad, pero se tiene la confianza de que el mundo evolucione dentro del abanico que representan estos escenarios de emisiones. A partir de ellos y de la fijación de carbono por sumideros (vegetación, océanos y suelo), utilizando modelos del ciclo del carbono, se deducen concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera y con la evolución futura de dichas concentraciones se puede proyectar el clima hacia el futuro, gracias a los modelos de simulación. En el panel izquierdo de la figura 6.1 se muestra la evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero durante el siglo XXI. En la figura aparecen englobadas las emisiones de todos ellos en lo que se denomina CO₂ equivalente, calculado teniendo en cuenta el mismo efecto de intensificación del efecto invernadero que todos los gases considerados juntos. Además de los escenarios SRES descritos anteriormente se dan aquí resultados para otros escenarios posteriores a la publicación del *Informe Especial* del año 2000, en los que se modifica la contribución de ciertas “fuerzas” condicionantes de las líneas evolutivas consideradas. En el panel derecho de dicha figura 6.1 se

muestran proyecciones de la temperatura media en superficie para varias familias de escenarios y la proyección correspondiente a mantener la concentración de los gases invernadero en los valores del año 2000. Hay que hacer notar que a pesar de este hecho, la temperatura seguiría aumentando aunque, evidentemente, a un ritmo mucho menor.

Si se analizan las proyecciones para las dos primeras décadas de este siglo, los resultados son muy poco dependientes del escenario considerado y del modelo usado (resulta un ritmo de calentamiento en superficie de 0,2°C por década). Sin embargo para las décadas finales del siglo no es así; las proyecciones dependen fuertemente del escenario considerado y también del modelo empleado. Por ejemplo, la estimación media multimodelo para el escenario B1 a final de siglo es 1,8°C (probablemente con rango de 1,1°C a 2,9°C) y para el escenario A1FI es 4,0°C (probablemente con rango de 2,4°C a 6,4°C), siempre por encima de la media del periodo 1980-1999. Nótese que esos valores están muy por encima de los observados para el aumento de la temperatura media en superficie para el siglo XX.

Teniendo en cuentas estas proyecciones de temperatura se ha

evaluado el efecto sobre el nivel global medio del mar (incluyen también las contribuciones de la fusión del hielo en Groenlandia y Antártida). La elevación a final del siglo XXI que depende, lógicamente, del escenario considerado iría del mínimo 0,18 m a 0,38 m para el escenario B1 al máximo 0,26 m a 0,59 m para el escenario A1FI. Estos valores son relativos al nivel medio del mar en 1980-1999.

Los modelos más complejos permiten llevar a cabo proyecciones climáticas globales en las que se puede apreciar la variabilidad espacial y temporal. En el último informe del IPCC (AR4) se incluyen una gran cantidad de proyecciones, de las que aquí se presentan sólo algunas.

En la figura 6.2 se tienen mapas de proyecciones medias multimodelo de temperatura superficial para diferentes alcances temporales y escenarios. Conviene destacar dos aspectos; primero, la poca diferencia existente en los mapas de la columna izquierda, como ya se había adelantado; segundo, la desigual distribución geográfica de los aumentos de temperatura, con un claro predominio de los valores en la región ártica donde la temperatura podría aumentar a final de siglo más de 7°C. En general, el calentamiento proyectado para el siglo XXI se espera que sea mayor sobre tierra y a altas latitudes del Hemisferio Norte y menor sobre el océano Austral y parte del

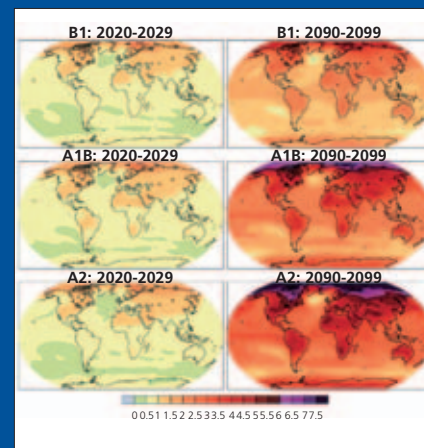


Figura 6.2. Cambios de temperatura superficial proyectados para inicios y finales del siglo XXI relativos al periodo 1980-1999. Los paneles a la izquierda y a la derecha muestran las proyecciones medias de multimodelos AOGCM para la media por decenios de los escenarios B1 (arriba), A1B (centro) y A2 (abajo) de 2020 a 2029 (izquierda) y de 2090 a 2099 (derecha).

Fuente: IPCC 2007.

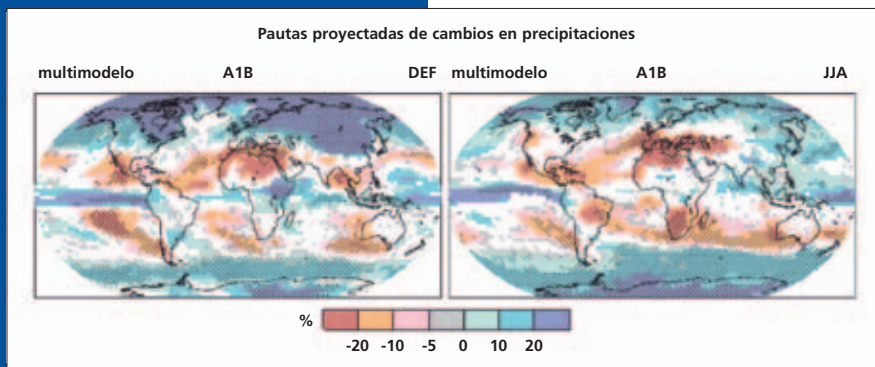


Figura 6.3. Cambios de la precipitación relativos (en valores porcentuales) para el periodo 2090-2099, respecto del periodo 1980-1999. Los valores son promedios multimodelo basados en el escenario A1B para los periodos diciembre-febrero (izquierda) y junio-agosto (derecha). Las áreas en blanco representan los lugares en que más de un 66% de los modelos coinciden en el signo del cambio, y las áreas punteadas representan los lugares en que más de un 90% de los modelos concuerdan en el signo del cambio.

Fuente: IPCC 2007.

Atlántico norte. En la zona de la Península Ibérica y del Mediterráneo occidental se proyectan valores superiores a la media global para todos los escenarios.

En la figura 6.3 se tienen proyecciones estacionales de la precipitación. Aunque se estima que en media global su valor aumente, probablemente en la mayor parte de las regiones subtropicales terrestres decrezca mientras que en latitudes altas muy probablemente la precipitación será más elevada. En la zona de la Península Ibérica y del Mediterráneo occidental se proyecta para final de siglo una importante reducción de la precipitación con respecto a la observada en el periodo 1980-1999.

Se han obtenido también proyecciones para otros aspectos importantes del clima. En general se puede decir que todos ellos continúan con la tendencia observada en el siglo XX pero, en la mayor parte de los casos, acentuándose.

Mención especial merece la fusión de los hielos en Groenlandia aunque la escala temporal sea superior al siglo. Hace unos 125.000 años la temperatura en la zona del Atlántico norte se mantuvo durante un periodo duradero por encima de las temperaturas actuales. La reducción de la masa de hielo hizo que el nivel del mar se elevara de 4 a 6 metros. Pues bien, si la temperatura fuera entre 1,9 y 4,6°C superior a la preindustrial durante al menos mil años, la fusión del hielo de Groenlandia podría producir una elevación media del nivel del mar en el planeta de 7 metros.

6.2. Cambio global y ecosistemas

El cambio climático es sólo uno de los motores del cambio global y la influencia que las actividades humanas tienen y tendrán sobre los sistemas naturales da lugar a todo un abanico de posibles escenarios de cambio global. Para comprender estos posibles escenarios es preciso analizar primero el impacto que ya han tenido y que previsiblemente tendrán los distintos motores de cambio sobre los diversos ecosistemas del planeta y las especies que los componen.

Durante los últimos cincuenta años, los seres humanos han alterado la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas del mundo de manera más rápida y generalizada que en ningún otro

periodo de la historia de la humanidad. Los ecosistemas se ven particularmente afectados por la pesca a gran escala, el empleo de agua dulce y la agricultura. Por ejemplo, entre 1950 y 1970 se convirtieron más tierras en tierras de cultivo que entre 1700 y 1850. Estos cambios se han llevado a cabo sobre todo para satisfacer la demanda creciente de alimentos, agua dulce, madera, fibra y combustible. Entre 1960 y 2000, la demanda de servicios de los ecosistemas creció significativamente como resultado de que la actividad económica mundial se multiplicó por seis. En este mismo periodo la extracción de agua de ríos y lagos se ha duplicado y el tiempo de retorno del agua dulce al mar se ha triplicado. Aunque a nivel global los seres humanos emplean el 10% del agua dulce disponible, en extensas zonas del planeta como el Próximo Oriente y el norte de África el consumo de agua dulce es del 120%, agotándose a ritmo creciente las reservas subterráneas. La sobrepesca ha diezmoado la biomasa de poblaciones de peces en el océano, que se encuentran, en su inmensa mayoría sobreexplotadas o ya agotadas, y algunas especies de vertebrados marinos se extinguieron por la caza tras la colonización humana de islas en el Caribe y en áreas de Australia y el SE asiático. El vertido de nitrógeno, fósforo y materia orgánica a los ecosistemas acuáticos y la costa ha aumentado notablemente, causando un problema de eutrofización, con la pérdida de calidad de aguas y sedimentos.

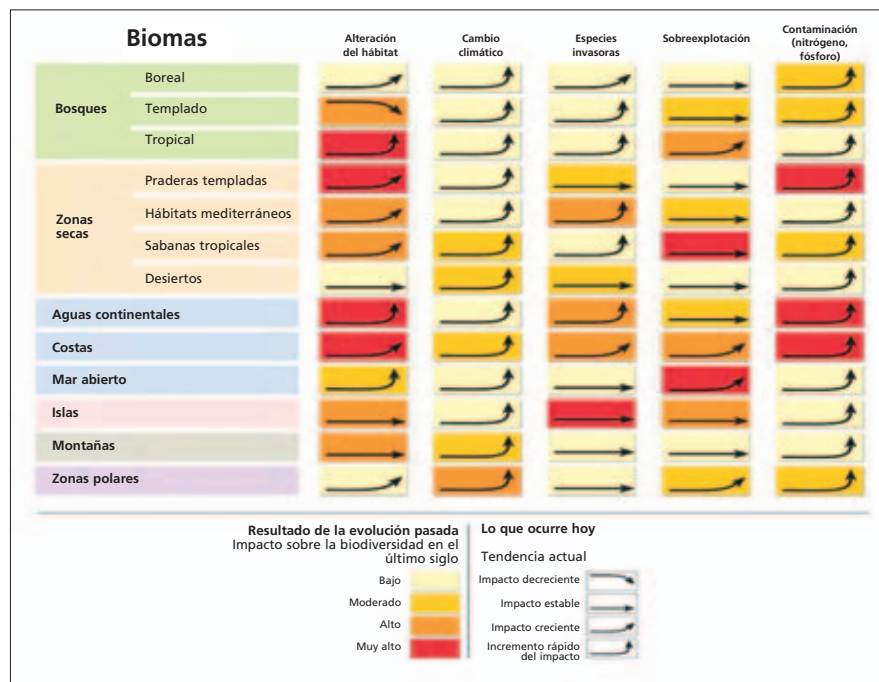


Figura 6.4. Impacto de los cinco motores principales de cambio global sobre la biodiversidad y tendencia actual de cada motor en los principales biomas terrestres.

Fuente: Millenium Assessment, 2005.

El resultado de todo esto ha sido una pérdida sustancial y en gran medida irreversible de la diversidad de la vida en la Tierra, tanto por una erosión del número de especies, particularmente las especies raras o menos abundantes, en las comunidades de la mayor parte de ecosistemas como por la extinción de un número importante de especies, más de 800, durante los últimos 500 años, incluida una docena de especies marinas. Las tasas de pérdida de biodiversidad y erosión de especies parecen seguir

acelerándose a pesar de los compromisos adquiridos por la Convención para la Diversidad Biológica de Naciones Unidas. A la intervención directa del ser humano en los sistemas naturales hay que sumar los efectos indirectos de las actividades humanas que repercuten en el clima y en los diversos motores del cambio global. De hecho, los cinco motores directos del cambio global están actuando cada vez de forma más intensa en la mayoría de los biomas del planeta (figura 6.4.).

Globalmente, la tasa de conversión de los ecosistemas es muy alta aunque la tendencia de esta tasa es a disminuir debido a que los ecosistemas de extensas regiones ya han sido convertidos o alterados (por ejemplo, dos tercios de la superficie de los bosques mediterráneos ya fueron convertidos principalmente en tierras de cultivo hacia 1990) y a que el incremento de la productividad de los cultivos ha disminuido la necesidad de expansión de terrenos dedicados a la agricultura. La extensión de las zonas dedicadas a cultivo se ha estabilizado en América del Norte y disminuye en Europa y China. Los ecosistemas más afectados por el cambio global son los ecosistemas acuáticos (tanto marinos como continentales), los bosques templados caducifolios, las praderas templadas y los bosques mediterráneos y tropicales. Las zonas de estuarios y deltas están en retroceso por el declive en el aporte de sedimentos el cual ha disminuido en un 30% a escala global. Distintas actividades humanas causan la desaparición de hábitats costeros con un papel clave en el mantenimiento de la biodiversidad marina, como bosques de manglar, arrecifes de coral, marismas y praderas submarinas, que desaparecen a un ritmo entre 2 y 10 veces superior a la tasa de pérdida del bosque tropical, que desaparece a un ritmo de un 0,5% anual. Sólo las zonas de tundra y los bosques boreales apenas han experimentado cambios y conversiones

apreciables durante el último siglo. Sin embargo, los ecosistemas de estas regiones polares y subpolares han comenzado a verse muy afectadas por el cambio climático y se cuentan entre los más vulnerables al calentamiento global (Starfield y Chapin, 1996).

Los impactos del cambio global sobre los ecosistemas afectan eventualmente los servicios que éstos prestan a la sociedad, que habitualmente los considera como servicios permanentes que no se incorporan en análisis de coste-beneficio, pero que tienen conjuntamente un valor económico colosal, similar al PIB del conjunto de las naciones. Estos servicios incluyen, entre otros, la provisión de alimento y materias primas, como la madera, y fármacos o recursos biotecnológicos, la regulación de la composición atmosférica (e.g. oxígeno, CO₂), la regulación climática (a través de la evapotranspiración, modificación del albedo y regulación de gases), la atenuación de perturbaciones (como crecidas, tormentas, temporales, huracanes, etc.), soporte para el ocio (e.g. ecoturismo, buceo), y actividades culturales, y servicios a la agricultura como la polinización de cultivos y el control de plagas.

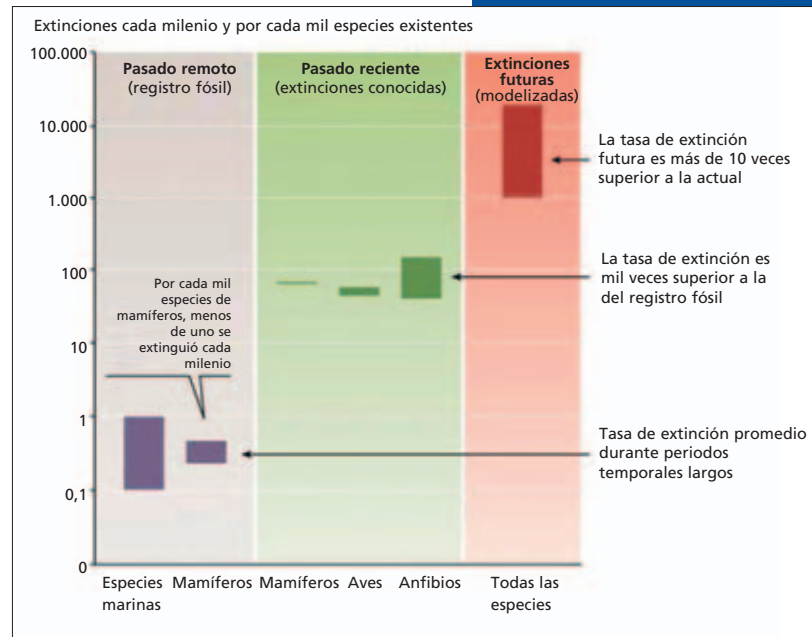
Cambio global y biodiversidad

La biodiversidad refleja el número, la variedad y la variabilidad de seres vivos en un ecosistema. Los cambios en la

biodiversidad en un lugar determinado afectan a la capacidad del ecosistema para prestar servicios y para recuperarse de perturbaciones. Hay dos aspectos simples pero cruciales que deben considerarse al abordar el cambio global y los ecosistemas: i) cada especie se ve afectada de forma diferente por una misma intensidad de cambio ambiental, ii) las especies que componen un ecosistema interaccionan entre sí de forma que existe un complejo entramado de relaciones que van desde la dependencia a la competencia pasando por la simbiosis o facilitación mutua de la existencia, como en el caso de los polinizadores. Teniendo en cuenta estos dos aspectos es fácil comprender que las consecuencias del cambio global sobre todo el ecosistema son muy complejas. El cambio global opera sobre las especies pero afecta a la intensidad y naturaleza de las interacciones entre ellas. Algo tan simple como la alteración en la fenología o ritmos estacionales de plantas y animales como consecuencia de cambios en el clima hace que se pierdan muchas sincronizaciones entre especies, de forma que una planta puede no encontrar a tiempo al polinizador o dispersor de sus frutos si adelanta su ciclo con el calentamiento, o muchos animales pueden no encontrar su alimento o su especie hospedadora si responden de forma muy marcada al clima (Peñuelas

y Filella, 2001). La pérdida de biodiversidad es uno de los efectos más importantes del cambio global sobre los ecosistemas. Las Naciones Unidas indican que la tasa actual de extinciones es entre cien y mil veces superior a la tasa de fondo esperable por causas naturales (figura 6.5.). Hay aproximadamente cien extinciones bien documentadas de especies de aves, mamíferos y anfibios en los cien últimos años, lo cual es entre cincuenta y quinientas veces más de lo que cabría esperar a partir de estimas realizadas sobre el registro fósil. Si bien la extinción de las especies es algo natural (las especies actuales representan sólo un 2-4% de las que ha albergado este planeta a lo largo de su historia), existen numerosas evidencias que apuntan a las actividades humanas como causa directa o indirecta del elevado ritmo de extinciones que tiene lugar en la actualidad.

Las introducciones de especies exóticas por la actividad humana ha sido uno de los procesos más importantes en la pérdida de especies. Muchas especies exóticas se acomodan en los ecosistemas de acogida sin desplazar a las especies locales, pero otras se comportan de forma invasiva, desplazando a las especies autóctonas. Así, la introducción del zorro y el gato en el continente australiano diezmo los pequeños marsupiales, muchos de ellos ya extintos y otros en grave peligro de



extinción. Los ambientes insulares, que muestran gran cantidad de endemismos, son particularmente vulnerables a la introducción de especies invasoras. Así, las islas del archipiélago Hawai'i han perdido un gran número de sus especies tras la introducción de especies exóticas tras su colonización. Los impactos de introducción de elementos exóticos al ecosistema pueden operar incluso dentro de especies, cuando desaparecen las barreras que aíslan poblaciones que han podido desarrollar parásitos específicos. Un ejemplo muy claro de esto es la mortalidad masiva de pueblos en América y Oceanía, víctimas de

Figura 6.5. Tasa de extinción de especies en tiempos remotos, en épocas recientes y en el futuro.

Fuente: Millenium Aesement, 2005.



enfermedades para las que no tenían defensas tras el contacto con los colonos occidentales. Las especies invasoras afectan la biodiversidad local, desplazando muchas especies autóctonas. Su comportamiento agresivo se explica frecuentemente por la ausencia de predadores y parásitos en las nuevas áreas donde se han introducido. En algunos casos se han intentado combatir introduciendo predadores, pero estas soluciones se han de evaluar cuidadosamente, pues es posible que los predadores también actúen sobre otras especies en su nuevo hábitat. La actividad humana ha introducido, por ejemplo, más de 2.000 especies de plantas a los EE.UU. y Australia, y unas 800 en Europa (Vitousek *et al.*, 2003), y se ha registrado la llegada de más de

500 especies exóticas en el mar Mediterráneo, algunas de ellas (e.g. el alga verde *Caulerpa taxifolia*) con un crecimiento agresivo. En algunos casos las especies invasoras pueden tener efectos positivos sobre el ecosistema, así, por ejemplo, la presencia del mejillón cebrá, que invade ríos y estuarios en Europa y Norteamérica, puede atenuar los efectos de la eutrofización sobre estos ecosistemas, aunque también afecta negativamente la biodiversidad local.

Efectos de los motores de cambio global en los ecosistemas terrestres

La fragmentación de hábitat debida a carreteras y vías de comunicación lleva a la extinción de especies que requieren mucho espacio continuo para sus ciclos vitales y el empobrecimiento genético de poblaciones aisladas y fragmentadas ha sido documentado para muchas especies animales y vegetales. El calentamiento global lleva a muchas especies a migrar en altitud y latitud, pero esta migración está muy restringida por las construcciones humanas y el uso del territorio, lo cual acrecienta el problema de las extinciones locales. En los ecosistemas de montaña, ricos en especies endémicas, no es posible la migración en altura, por lo que el impacto del calentamiento sobre ellos es desproporcionadamente alto. En

general resulta difícil separar los efectos sobre la biodiversidad y los procesos ecosistémicos debidos a cada uno de los varios motores de cambio global. En el caso de los ecosistemas terrestres de nuestras latitudes, el cambio climático y los cambios de uso del territorio operan simultáneamente de forma que el efecto observado es rara vez atribuible en exclusividad a uno de ellos y la estima de la contribución relativa a los cambios observados es sólo aproximada.

Todo indica a que de aquí a 2100 el cambio climático se irá convirtiendo en el principal motor directo de cambio global, determinando cada vez en mayor medida la pérdida de biodiversidad y la alteración del funcionamiento y de los servicios de los ecosistemas terrestres a escala mundial. Aunque es posible que algunos servicios de los ecosistemas en algunas regiones se beneficien al principio de los aumentos de temperatura o precipitación previstos, se espera a escala mundial un importante impacto negativo neto en estos servicios una vez que la temperatura supere en 2°C los niveles preindustriales o que el calentamiento crezca más de 0,2°C por década. El cambio climático ha afectado a los ecosistemas terrestres europeos principalmente en relación a la fenología (ritmos estacionales de los ciclos vitales de las especies) y a la distribución de las especies animales y vegetales. Numerosas especies vegetales

han adelantado la producción de hojas, flores y frutos, y un buen número de insectos han sido observados en fechas más tempranas (EEA, 2004). El calentamiento global ha incrementado en 10 días la duración promedio de la estación de crecimiento entre 1962 y 1995. En apoyo de esta tendencia, la medida del verdor de los ecosistemas mediante imágenes de satélite (una estimación comprobada de la productividad vegetal) ha incrementado en un 12% durante este periodo. No obstante, hay que precisar que este incremento en la duración de la estación de crecimiento no implicaría un incremento real del crecimiento y productividad en los ecosistemas mediterráneos, ya que el calentamiento iría aparejado de una menor disponibilidad de agua (Valladares *et al.*, 2004) y un aumento de las pérdidas por respiración. La migración de diversas especies vegetales termófilas hacia el norte de Europa ha incrementado la biodiversidad en estas zonas, pero la biodiversidad ha disminuido o no ha variado en el resto del continente. La combinación de calentamiento global y cambios de uso ha dado lugar al ascenso bien documentado en altitud de hayedos en el Montseny y arbustos y mariposas en la sierra de Guadarrama (Valladares, 2006). Muchas especies endémicas de alta montaña se encuentran amenazadas por la migración altitudinal de arbustos

y especies más competitivos propios de zonas bajas y por el hecho de que las temperaturas previstas para las próximas décadas están fuera de sus márgenes de tolerancia.

En el periodo 1990-1998 la biosfera terrestre de Europa ha sido un sumidero neto de carbono, compensando en parte las emisiones antropogénicas de CO₂ y contribuyendo a la atenuación del cambio climático (EEA, 2004). Este balance positivo en la captura de carbono, que se ha mantenido durante los últimos 20 años, es improbable que se mantenga en un futuro cercano (o al menos no en los niveles actuales) ya que el incremento de temperatura reducirá la capacidad de secuestro de CO₂ de los ecosistemas europeos, al incrementar la actividad respiratoria. Esta captura de carbono se puede incrementar mediante planes de reforestación y una política agraria adecuada, pero este incremento será pequeño en relación a los objetivos establecidos en el Protocolo de Kioto.

La supervivencia de las aves que permanecen durante el invierno en Europa ha aumentado debido a la atenuación de las temperaturas invernales. Esta supervivencia seguirá incrementando en paralelo al incremento de las temperaturas previsto, pero el efecto neto de esta mayor supervivencia sobre las poblaciones de aves es incierto. Se han observado cambios significativos en las

fechas de llegada y salida de numerosas especies de aves migratorias. En varios estudios realizados en la Península Ibérica, sin embargo, se ha visto que el cambio climático ha generado una disminución del éxito reproductor de aves como el papamoscas cerrojillo, debido al desacoplamiento del calendario de llegadas con los ritmos de la vegetación y de los invertebrados que le sirven de sustento en los ecosistemas receptores españoles (Sanz *et al.*, 2003).

Un aspecto importante del cambio global en nuestras latitudes es la creciente importancia de los incendios. Las futuras condiciones más cálidas y áridas, junto con el incremento de biomasa y su inflamabilidad debidas al abandono del campo aumentan la frecuencia e intensidad de los incendios forestales. Los catastróficos incendios sufridos en España y Portugal durante los veranos de 2003, 2005 y 2006 apoyan esta tendencia.

El aumento de temperatura tiene numerosos efectos directos sobre la actividad de los organismos vivos. Uno ambientalmente importante es el aumento exponencial de la emisión biogénica de compuestos orgánicos volátiles (VOC) por parte de las plantas. Estas emisiones afectan a la química atmosférica, no solamente con respecto al ciclo del carbono y a la formación de aerosoles, sino por su papel en el equilibrio oxidativo de la atmósfera. Nuestra comprensión de las

causas de las emisiones de VOC y de sus consecuencias en un mundo cambiante es aun fragmentaria (Peñuelas, 2004).

Los ciclos de vida de organismos que no controlan su temperatura corporal, como los invertebrados, los anfibios y los reptiles se ven directamente afectados por el calentamiento global. Numerosos estudios indican fracasos en la reproducción de anfibios y reptiles asociados con el calentamiento y los cambios en el régimen de precipitaciones. Estos fracasos en la reproducción de anfibios y reptiles se ven afectados por un cúmulo de circunstancias asociadas con sus rasgos biológicos (e.g. producción de huevos de cáscara blanda, permeables, sin cuidado paterno; determinación del sexo por la temperatura durante el desarrollo embrionario) y por la combinación de diversos motores de cambio relacionados con la alteración de los hábitats.

El cambio global en el medio marino

El cambio global también afecta de pleno a los ecosistemas marinos. A diferencia de la Tierra donde los animales son producidos en instalaciones ganaderas, la mayor parte de la provisión de alimento a partir del océano se hace mediante la explotación de poblaciones salvajes. La intensificación de la actividad pesquera a lo largo del siglo XX ha diezclado los

stocks pesqueros, causando una disminución de la biomasa pesquera que se estima en un 90%. Esto ha supuesto un cambio fundamental en la organización de las cadenas tróficas marinas, cuyos niveles superiores han sido cercenados, cuyas consecuencias no se conocen en detalle, pero parecen incluir la proliferación global de medusas, al verse reducidos sus predadores (tortugas, pez luna, etc.) y sus competidores (otros peces). Además, muchas medusas se alimentan de larvas de peces, con lo que su proliferación puede dificultar la recuperación de las poblaciones de peces. Otra consecuencia parece ser las proliferaciones algales en ecosistemas costeros, incluidos los arrecifes de coral, ya que muchas de las especies de peces que han sido diezcladas son herbívoras. Los hábitats costeros, como arrecifes de coral, manglares, marismas, campos de microalgas y praderas submarinas han experimentado, como se ha comentado más arriba, importantes pérdidas de extensión, que continúan amenazándolos, con la pérdida asociada de la biodiversidad que albergan.

El aumento de la temperatura del océano ha propiciado cambios en los rangos de distribución de especies, mucho más rápidos que los que se observan en ecosistemas terrestres, debido al carácter abierto del sistema oceánico y la gran movilidad de las especies marinas. Estos cambios han

sido particularmente importantes en el Mediterráneo, que por su carácter semi-cerrado amplifica la señal térmica, con la entrada de más de 500 especies exóticas, la mayor parte de ellas de origen tropical. Mientras que muchas de ellas se asientan en el ecosistema sin causar problemas aparentes, algunas especies se comportan de forma agresiva desplazando a las especies autóctonas. Destaca, por ejemplo, el alga verde *Caulerpa taxifolia*, originaria de Australia e introducida accidentalmente en el Mediterráneo hace dos décadas, que ha causado problemas importantes en este mar y que se han reproducido tras su llegada, quince años más tarde, en las costas de California.

El aumento de temperatura en el océano está causando cambios importantes en el ecosistema más allá de los cambios en rangos de especies. Las altas temperaturas aumentan la tasa metabólica de los organismos, con un aumento de la respiración que, unido a la menor solubilidad del oxígeno en aguas más cálidas, genera problemas de hipoxia en el océano, agravados porque el proceso de eutrofización (exceso de aporte de nitrógeno, fósforo y materia orgánica) genera un exceso de producción de materia orgánica que, al descomponerse, consume oxígeno. El número de áreas hipóxicas en el océano está creciendo rápidamente y se calcula que podría duplicarse su extensión con incrementos de temperatura del mar de



entre 2 y 4°C. La hipoxia causa la mortalidad de las especies animales, particularmente de peces y crustáceos, que son las más vulnerables. El aumento de temperatura incrementa también la mortalidad de células de fitoplancton, que liberan sus contenidos celulares al medio, estimulando la actividad bacteriana y restando efectividad a la bomba biológica de secuestro de CO₂. De hecho, el aumento de entre 2 y 4°C en temperatura del océano incrementa la respiración más allá de lo que aumenta la producción primaria haciendo bascular al plancton oceánico de actuar como un sumidero a una fuente de CO₂, agravando el calentamiento global. El aumento de temperatura también causa la mortalidad de

La playa Shell Beach (Shark Bay, Australia occidental) está formada por más de 180 km de acúmulos de pequeñas conchas.

Fotografía: C. M. Duarte.



Acúmulo de hojarasca de praderas submarinas en Two Peoples Bay (Esperance, Australia Occidental).

Fotografía: C. M. Duarte.

organismos que generan hábitat, como los arrecifes de coral y las praderas de angiospermas submarinas. Ambos tipos de organismos parecen tener un umbral térmico de 29°C por encima del cual experimentan mortalidad masiva, como la constatada en los episodios de blanqueamiento del coral y el aumento de la mortalidad de las praderas de *Posidonia oceánica* del Mediterráneo tras episodios de calentamiento que llevaron la temperatura del mar por encima del umbral de 29°C. Dado que los modelos

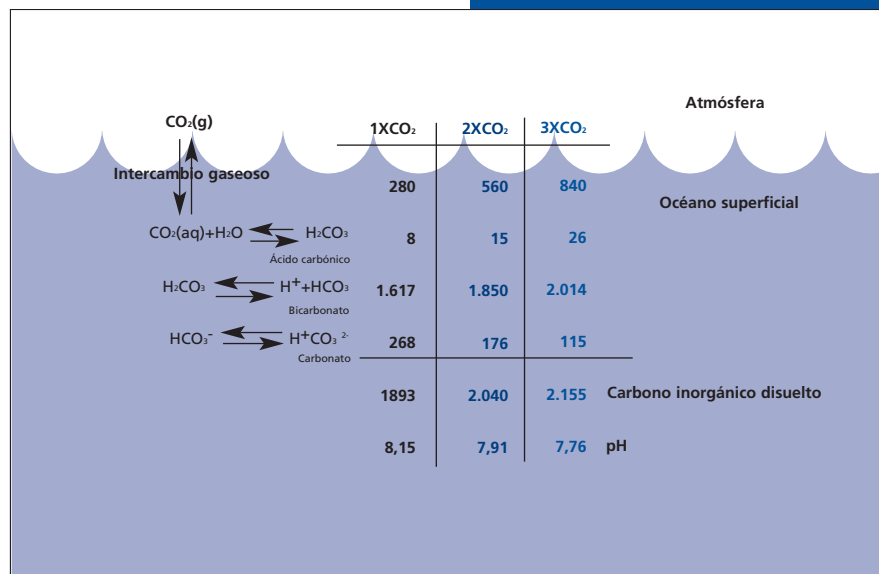
climáticos predicen que los episodios de calentamiento del océano por encima de 29°C se van a incrementar, en frecuencia y duración, todo apunta a una presión progresiva sobre los ecosistemas más sensibles a la temperatura, como los arrecifes de coral y las praderas submarinas, que se encontrarán entre los más afectados por el cambio global.

Los ecosistemas polares están experimentando cambios particularmente vertiginosos asociados

a la reducción de la extensión del hielo marino, más notable en el Ártico que en la Antártica. La reducción del hielo marino afecta la reproducción de muchas especies que dependen del hielo, como focas y el krill antártico —el animal más abundante del planeta— que se reproduce asociado al hielo. La disminución de la extensión de hielo antártico ha llevado a la reducción, por un factor de más de 10, de la abundancia de krill, que es el nodo central de la cadena trófica antártica, con fuertes, pero pobremente conocidas, repercusiones en toda la cadena trófica. En el Ártico se teme por especies como el oso polar, que dependen del hielo marino para cazar. La fusión de los hielos causa, además, una rápida liberación de los materiales, como contaminantes, acumulados en ellos, lo que puede generar un estrés adicional sobre las especies polares.

Las amenazas del cambio global se extienden más allá de los impactos de la temperatura. La figura 6.6. muestra cómo los diferentes escenarios de concentraciones de CO₂ atmosféricos

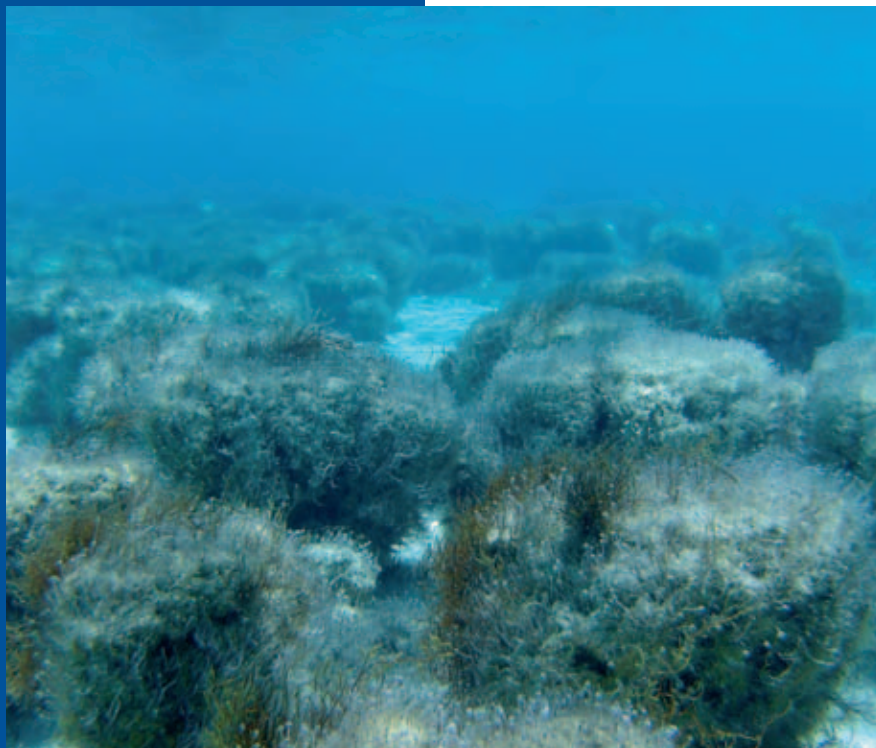
dan lugar a distintas concentraciones de carbono inorgánico disuelto en el mar y afectan al pH del agua marina., de forma que el incremento de CO₂ causa la acidificación del océano. Las concentraciones de CO₂ de origen antropogénico crecen en la capa superficial del mar y en los primeros 700 metros a una tasa acorde al incremento que anualmente acontecen en la atmósfera, teniendo en cuenta la solubilidad del CO₂ en agua de mar. En capas más profundas los valores son inferiores. Para aguas de superficie en equilibrio con la atmósfera, es posible calcular las diferencias en todas las especies del sistema de CO₂, con aumento de CO₂ disuelto, ácido carbónico y bicarbonato, y descenso en la concentración de ión carbonato y pH. El impacto directo de este efecto es que el agua se vuelve más ácida. La acidez del océano podría ser ahora la más alta registrada en los últimos cinco millones de años. Y un efecto inmediato de esto es que ha cambiado el estado de saturación de los océanos respecto a las partículas de carbonato cálcico. Esto dificulta la vida de organismos que utilizan el carbonato cálcico para fabricar sus conchas. A profundidades en las que las concentraciones de carbonato cálcico caen por debajo de un cierto límite las conchas de algunos organismos empiezan a disolverse. El fenómeno va a ir en aumento, primero en las aguas



frías de las latitudes altas y después, poco a poco, en las ecuatoriales (Feely *et al*, 2004). Algunos ejemplos de este descenso de pH es la reducción en la calcificación de cocolitoforales (Riebesell *et al*, 2000), el efecto del blanqueado de arrecifes de coral, y la deformación de las larvas de erizo. Esta especie es usada para determinar el grado de contaminación en aguas costeras. Según las estimaciones, si se mantiene la tendencia actual de crecimiento de las emisiones de CO₂, en el caso del plancton, las tasas de calcificación pueden caer hasta de un 25% a un 45% a niveles CO₂ equivalentes a 700-800 ppm, que se alcanzarán en un siglo.

Figura 6.6. Cambios en las concentraciones de las distintas formas del carbono inorgánico disuelto (DIC) y del pH del agua de mar como consecuencia de cambios en las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera. Se presentan datos para tres niveles de dióxido de carbono atmosférico: nivel actual, doble y triple concentración.

Fuente: IPCC, 2001.



Estromatolitos, las formas más antiguas de vida conocida, en Hamelin Pool (Shark Bay, Australia Occidental).

Fotografía: C. M. Duarte.

Ríos y colaboradores (2001) calcularon para el Atlántico una tasa de incorporación de carbono antropogénico integrada hasta 2.000 metros de profundidad de $0,95 \text{ mol m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Teniendo en cuenta la zona atlántica entre Galicia y País Vasco correspondiente a las 200 millas se obtiene aproximadamente una captación anual de $3,8 \cdot 10^{12} \text{ gC}$. Considerando las aguas atlánticas que rodean la Península Ibérica, la captación sería aproximadamente de

$7,6 \cdot 10^{12} \text{ gC/año}$. El incremento de CO_2 en nuestras aguas superficiales implica un descenso del pH de 0.15 y esto tiene unas consecuencias en la biodiversidad de nuestros mares que empiezan a ser detectadas en algunos sistemas bien controlados. Estos cambios de pH tienen lugar simultáneamente con el calentamiento del agua marina, lo cual afecta a su productividad. Trabajos realizados por un grupo de investigadores del Instituto de Investigaciones Marinas del CSIC muestran una tendencia al calentamiento y pérdidas de productividad en algunos de nuestros mares regionales. Los datos de temperatura y clorofila media para la región de Golfo de Vizcaya y Finisterre ($40\text{-}50^\circ\text{N}$ y 4 a 20°W) obtenidos a partir de sensores a bordo de satélites procesados por el Grupo de Oceanografía Espacial del CSIC en Cádiz muestran un significativo descenso de los niveles de clorofila durante los últimos siete años y un incremento de $0,4^\circ\text{C}$ en la última década.

La dimensión temporal del cambio global

Muchos de los impactos, tanto positivos como negativos, que los seres humanos tienen sobre los ecosistemas tardan en manifestarse (figura 6.7.). Por ejemplo, el empleo de fuentes de agua subterránea puede superar la capacidad

de recarga durante algún tiempo hasta que comiencen a aumentar sustancialmente los costes de extracción. En general, se gestionan los ecosistemas de forma que se priman los beneficios a corto plazo sin tener en cuenta los costes a largo plazo. Los distintos servicios de los ecosistemas tienden a cambiar en escalas de tiempo diferentes. Por ejemplo, los servicios de apoyo (como la formación de suelo o el crecimiento vegetal) y los servicios de regulación (como la regulación del agua y de enfermedades) tienden a cambiar en escalas de tiempo mucho mayores que los servicios de provisión. En consecuencia, suelen pasarse por alto los impactos en aquellos servicios que cambian más lentamente.

El grado de inercia de los distintos motores de cambio en los ecosistemas difiere considerablemente. Algunos motores de cambio, como la sobreexplotación de ciertas especies, presentan desfases temporales más bien cortos y el impacto del motor de cambio puede ser reducido o detenido rápidamente. La carga de nutrientes y especialmente el cambio climático presentan desfases mucho mayores de forma que los efectos de tales motores de cambio no pueden reducirse en años o décadas. La extinción de especies debido a la pérdida de hábitat también presenta un gran desfase temporal. Incluso si se detuviese ahora la pérdida de hábitat, se tardarían cientos de años

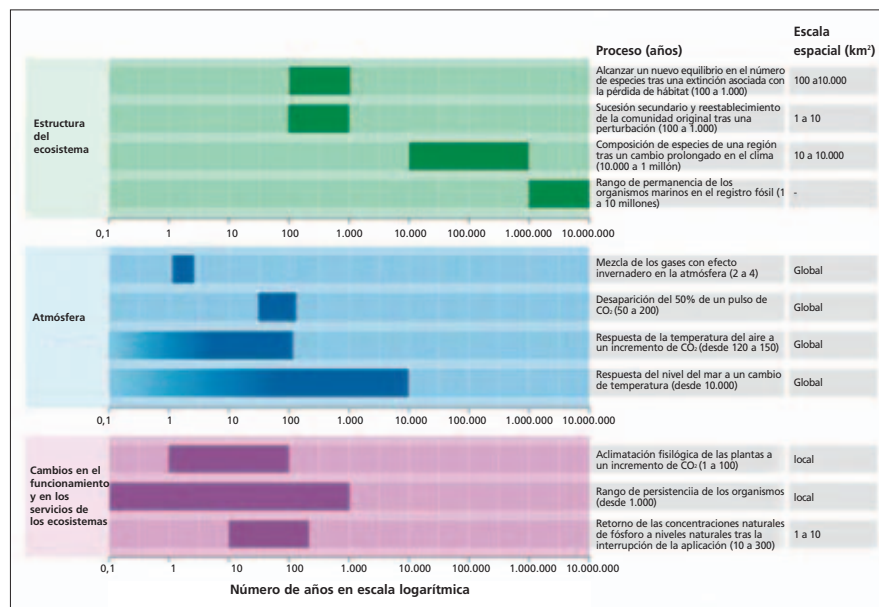


Figura 6.7. Escala temporal y espacial de procesos ecosistémicos y atmosféricos afectados por el cambio global.

Fuente: Millenium Assessment, 2005.

en conseguir que el nuevo número de especies alcance un nuevo equilibrio más bajo, en respuesta a los cambios de hábitat que ocurrieron en los últimos años.

Para algunas especies este proceso puede ser rápido, pero para otras, como es el caso de los árboles, puede llevar siglos o milenios. Tal es el caso también de las praderas submarinas de *Posidonia ocedónica* en el Mediterráneo. En consecuencia, reducir el ritmo de pérdida de hábitats sólo tendría un pequeño impacto en las tasas de extinción del próximo medio siglo, pero

conduciría a beneficios sustanciales a largo plazo. Los desfases temporales entre la reducción de los hábitats y la extinción ofrecen una oportunidad para restaurar hábitats y rescatar especies de la extinción.

La mayoría de los cambios en los ecosistemas y en sus servicios son graduales, de forma que, al menos en principio, son detectables y predecibles. Sin embargo, existen muchos ejemplos de cambios no lineales y en ocasiones abruptos. Un cambio puede ser gradual hasta que una presión determinada en el ecosistema alcanza un umbral a partir



Diversidad de orquídeas en el Orchid Garden, Singapur.

Fotografía: C. M. Duarte.

del cual ocurren cambios rápidos, que alteran de forma cualitativa el funcionamiento del ecosistema, desembocando en un nuevo estado. Las capacidades para predecir cambios no lineales están mejorando; sin embargo, la ciencia aún no es capaz de predecir los umbrales exactos en la mayoría de los casos. Algunos ejemplos de cambios ambientales abruptos importantes son los siguientes:

- *Cambio climático regional.* La vegetación de una región influye en el clima ya que afecta a la cantidad de luz solar que se refleja, a la cantidad de agua que liberan las plantas en la atmósfera y a la velocidad del viento y de la erosión. En la región del Sahel, la cobertura vegetal está fuertemente relacionada con la cantidad de precipitaciones. Cuando hay vegetación, el agua de lluvia se recicla rápidamente, aumentando en general el nivel de precipitaciones y conduciendo, a su vez, a una mayor densidad de vegetación. La degradación de la tierra reduce el reciclaje de agua y puede haber contribuido a la reducción de las precipitaciones en la región del Sahel durante los últimos 30 años.
- *La introducción y la pérdida de especies.* La introducción de especies exóticas (e.g. conejo en Australia, mejillón cebra en zonas de agua dulce, el ctenóforo gelatinoso *Mnemiopsis leidyi* en el Mar Negro) puede desencadenar alteraciones

profundas y rápidas en el funcionamiento de los ecosistemas receptores. Como ejemplo concreto de los efectos no lineales de una extinción local, la pérdida de las nutrias marinas en numerosos ecosistemas costeros de la costa pacífica de Norteamérica debido a la caza condujo a un desarrollo explosivo de las poblaciones de erizos de mar (especie que sirve de alimento para las nutrias) que a su vez originó la pérdida de los bosques de las algas kelp (que sirven de alimento para los erizos de mar).

- *Cambios en las especies dominantes en los ecosistemas.* Por ejemplo, algunos ecosistemas coralinos han pasado súbitamente de ser dominados por coral a ser dominados por algas. En los sistemas coralinos de Jamaica, siglos de pesca intensiva de especies devoradoras de algas contribuyeron a un cambio repentino a corales con poca diversidad, dominados por las algas y con muy poca capacidad para sustentar la vida de caladeros para la pesca. Cambios similares, de dominio de angiospermas marinas a microalgas oportunistas se han constatado también en numerosas áreas costeras.
- *Explosiones de algas y muerte de peces por la carga excesiva de nutrientes (eutrofización) de ecosistemas costeros y de agua dulce.* Una vez que se alcanza cierto umbral en la carga de nutrientes, los cambios son abruptos y generalizados, causando explosiones en

el crecimiento de algas que puede matar la fauna acuática al aparecer zonas con poco oxígeno.

- *Colapso de pesquerías.* Al aumentar las capturas se puede sobrepasar un umbral a partir del cual no quedan suficientes peces adultos para producir la suficiente descendencia que aguante el nivel de capturas. Por ejemplo, las reservas atlánticas de bacalao procedentes de la costa este de Terranova colapsaron en 1992, causando el cierre forzado del caladero, que no se ha recuperado tras casi 15 años de moratoria. Por el contrario, la pesquería de arenque del Mar del Norte se recuperó tras el obligado cierre de cuatro años a finales de los años 70 por el colapso debido a la sobreexplotación.
- *Enfermedades contagiosas.* Una epidemia se propaga si se sobrepasa un cierto umbral de transmisión: una media de contagio de al menos una persona por cada persona infectada. Cuando las personas viven muy cerca unas de otras y en contacto con animales infectados, las epidemias pueden propagarse deprisa gracias a la interconexión y gran movilidad de la población mundial. La aparición casi instantánea del SARS (síndrome respiratorio agudo severo) en diferentes partes del mundo y el caso de la gripe aviaria son ejemplos de este potencial en el que diversos motores de cambio global confluyen incrementando el riesgo de pandemias.

6.3. Escenarios del cambio global

Con el conocimiento de los cambios ambientales acontecidos y con la integración de los principales aspectos socioculturales, la “Evaluación de los Ecosistemas del Milenio” (Millennium Ecosystem Assessment, www.maweb.org) establece cuatro grandes escenarios generales, que no se plantean como predicciones sino que pretenden explorar aspectos poco predecibles de los cambios en los motores de cambio global y en los servicios de los ecosistemas. Ningún escenario representa la continuidad de la situación actual, aunque todos parten de la situación y tendencias actuales. Los diferentes escenarios suponen un aumento de la globalización o un aumento de la regionalización, así como una actitud de reacción, donde sólo se afrontan los problemas cuando se convierten en algo evidente, y por otro lado la actitud de acción, donde la gestión activa de los ecosistemas busca deliberadamente la preservación a largo plazo de los servicios de los ecosistemas antes de que los problemas sean muy graves o remediabiles.

Escenarios 1 y 2: un mundo globalizado

- *Escenario 1.* Manejo Reactivo de los ecosistemas: “Orquestación Global”. Este escenario representa una sociedad

conectada globalmente por el comercio global y la liberalización económica, que toma una actitud reactiva para la solución de los problemas de los ecosistemas. No obstante, también toma medidas efectivas para la reducción de la pobreza y las desigualdades y realiza inversiones públicas en infraestructuras y en educación. El crecimiento económico de este escenario es el más alto de los cuatro y se estima que la población humana en el 2050 será la más baja.

- *Escenario 2.* Manejo proactivo de los ecosistemas: “Tecno-jardín”. Este escenario representa una sociedad conectada globalmente; pero que depende en gran medida de tecnologías “verdes”, respetuosas con el medio ambiente, y una actitud proactiva en la resolución de los problemas ambientales. Depende de ecosistemas altamente gestionados para proporcionar los servicios de los que depende. El crecimiento económico es relativamente alto y tendente a acelerarse, mientras que la población en el 2050 estará en el término medio de los cuatro escenarios.

Escenarios 3 y 4: un mundo regionalizado

- *Escenario 3.* Manejo Reactivo de los ecosistemas “Orden desde la fuerza”. Este escenario representa un mundo regionalizado y fragmentado,



Primavera en las Islas Svalbard, Ártico.

Fotografía: C. M. Duarte.

preocupado por la seguridad y la protección, que enfatiza los mercados regionales, presta poca atención a los bienes públicos y toma una actitud reactiva frente a los problemas ambientales. El crecimiento económico es el más bajo de los cuatro escenarios (especialmente bajo en los países en desarrollo) y tiende a disminuir mientras que el crecimiento de población será el más alto.

- *Escenario 4.* Manejo Proactivo de los ecosistemas “Mosaico adaptativo”. En este escenario las regiones, a la escala de cuencas hidrográficas, son el núcleo de la actividad política y económica. Las instituciones locales se fortalecen y las estrategias locales de manejo de los ecosistemas son comunes. Las sociedades desarrollan un manejo altamente proactivo de los ecosistemas. El crecimiento económico es inicialmente lento pero crece con el tiempo, y la población en el año 2050 es casi tan alta como en el escenario “Orden desde la fuerza”.

Tal como sugieren estos escenarios, los motores directos e indirectos que van a afectar a los ecosistemas durante los próximos 50 años van a ser fundamentalmente los mismos que hoy. Sin embargo, va a cambiar la importancia relativa de los distintos motores de cambio. El cambio climático y la concentración de altos niveles de nutrientes en el agua van a ser problemas

cada vez más importantes, mientras que el crecimiento de la población va a serlo relativamente menos. Los escenarios predicen que la rápida conversión de los ecosistemas para su empleo en agricultura, suelo urbano e infraestructuras va a seguir avanzando. Tres de los cuatro escenarios predicen mejoras al menos en algunos de los servicios de los ecosistemas. No obstante, en muchos casos, los usos de los ecosistemas por parte de las personas aumentarán sustancialmente. Los cuatro escenarios prevén que va a continuar la rápida transformación de los ecosistemas. Se espera que entre un 10 y un 20% de los pastos y bosques actuales sean transformados debido a la expansión de la agricultura, las ciudades y las infraestructuras. Asimismo, los cuatro escenarios prevén que la pérdida de hábitats terrestres conducirá, de aquí al año 2050, a una fuerte caída de la diversidad local de especies nativas y de los servicios asociados. Las pérdidas de hábitats previstas en los cuatro escenarios conducirán a extinciones a nivel mundial a medida que las poblaciones se ajusten a los hábitats restantes. Por ejemplo, el número de especies de plantas podría reducirse un 10-15% como consecuencia de la pérdida de hábitats sufrida entre 1970 y 2050.

Los distintos escenarios sugieren que la gestión activa de los ecosistemas es, en general, ventajosa, y especialmente bajo condiciones cambiantes o novedosas. Las

sorpresas en los ecosistemas son inevitables debido a que las interacciones implicadas son complejas y a que en la actualidad aún no se comprenden bien las propiedades dinámicas de los ecosistemas. Un planteamiento de acción activa es más beneficioso que un planteamiento de reacción frente a problemas porque la restauración de servicios de un ecosistema degradados o destruidos es más costosa en tiempo y dinero que la prevención de la degradación y no siempre es posible.

Cambios previsibles en los servicios de los ecosistemas y en el bienestar humano

Todos los escenarios indican que aumentará sensiblemente el empleo de los servicios de los ecosistemas por parte de los humanos. En muchos casos, esto conduce a un deterioro de la calidad de los servicios e incluso a una reducción de su cantidad. Es probable que la seguridad alimentaria siga fuera del alcance de gran parte de la población, y se espera que los recursos mundiales de agua dulce sufran cambios grandes y complejos que afecten a una proporción creciente de la población. La demanda creciente de pescado conduce a un mayor riesgo de colapso de las reservas marinas a escala regional, que podría ser contrarrestada si el crecimiento actual de la acuicultura consigue superar cuellos de botella actuales y reducir sus impactos ambientales.



Puesta de sol espectacular, por los colores generados por la alta carga de polvo en la atmósfera, en Cap Ses Salines (Mallorca).

Fotografía: C. M. Duarte.

La contribución futura de los ecosistemas terrestres a la regulación del clima es incierta. La emisión o captación de carbono por los ecosistemas afecta a la cantidad de ciertos gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera y de ese modo regula el clima de la Tierra. En la actualidad, los ecosistemas terrestres son un sumidero neto de carbono, que absorbe cerca del 20% de las emisiones de combustibles fósiles. Es muy probable que este servicio de regulación climática se vea afectado por los cambios en el uso de las tierras, aunque es difícil de predecir ya que nuestra comprensión de los procesos de respiración del suelo es limitada. Los servicios de los ecosistemas áridos y desérticos son especialmente vulnerables

a los cambios y en especial a aquellos debidos al cambio climático, al estrés hídrico y a usos intensivos. El océano seguirá captando CO₂ de la atmósfera, principalmente por la bomba de solubilidad, pues la bomba biológica ve reducida su actividad, o incluso podría bombear CO₂ en sentido opuesto, hacia la atmósfera, por efecto del incremento de temperatura.

Las acciones para incrementar un servicio de un ecosistema suelen causar la degradación de otros servicios, lo que a su vez causa daños importantes al bienestar humano. Ejemplos de esto son el aumento del riesgo de cambios no lineales en los ecosistemas, la pérdida de capital natural, la agudización de la pobreza o el aumento de desigualdades entre grupos de

población. Es difícil evaluar las implicaciones del cambio global sobre los ecosistemas y dar recomendaciones precisas para su gestión porque muchos de los efectos tardan en manifestarse, porque pueden ocurrir a cierta distancia y porque los actores que cargan con estos costes no suelen ser los mismos que los que recogen los beneficios de las alteraciones.

En general, se espera que la salud humana mejore en el futuro en la mayoría de escenarios. Sólo el

escenario que combina regionalización con una gestión de reacción podría llevar a una espiral negativa de pobreza, empeoramiento de la salud y degradación de los ecosistemas en los países en vías de desarrollo. La degradación de los servicios de los ecosistemas está afectando particularmente a la población más pobre y más vulnerable del planeta, y representa en ocasiones el principal factor generador de pobreza y eventualmente flujos migratorios.

La pobreza, a su vez, tiende a aumentar la dependencia de los servicios que prestan los ecosistemas. Esto puede provocar más presión sobre los ecosistemas y acarrear una espiral descendente de pobreza y degradación de los ecosistemas en el futuro que se ha de prevenir con políticas claras que incorporen la evaluación de los servicios de los ecosistemas y los efectos de su pérdida en los escenarios macroeconómicos de las naciones.

Referencias

- EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (2004). "Impacts of Europe's changing climate. An indicator-based assessment". *EEA Copenhagen Report*, 2:1-107.
- IPCC (2001). *Climate change 2001: The Scientific basis*. Cambridge Univ. Press., New York.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005). *Ecosystems & Human Well-Being: Wetlands and water synthesis*. World Resources Institute, Washington, D.C.
- PEÑUELAS, J. (2004). "Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles como paradigma de la interacción del bosque con la atmósfera". En Valladares, F. (ed.). *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*, Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, pp. 281-308.
- PEÑUELAS, J. y FILELLA, I. (2001). "Phenology: responses to a warming world". *Science*, 294: 793-795.
- RÍOS, A. F.; PÉREZ, F. F. y FRAGA, F. (2001). "Long-term (1977-1997) measurements of CO₂ in the eastern North Atlantic: evaluation of anthropogenic input". *Deep-Sea Research II*, 48:2227-2239.
- SANZ, J. J.; POTTI, J.; MORENO, J.; MERINO, S. y FRÍAS, O. (2003). "Climate change and fitness components of a migratory bird breeding in the Mediterranean region". *Global Change Biology*, 9:1-12.
- STARFIELD, A. M. y CHAPIN, F. S. (1996). "Model of transient changes in arctic and boreal vegetation in response to climate and land use change". *Ecological Applications*, 6:842-864.
- VALLADARES, F. (2006). "Consecuencias del cambio climático en España". *Quercus*, 243:22-30.
- VALLADARES, F.; PEÑUELAS, J. y CALABUIG, E. L. (2004). "Ecosistemas terrestres". En Moreno, J. M. (ed.). *Evaluación de los impactos del cambio climático en España*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, pp. 65-112.

7. El impacto social del cambio global

La importancia del cambio climático para las sociedades es tan central que el desarrollo de la civilización se remonta al cambio climático que dio lugar al fin de la última glaciación en el Holoceno, con el rápido desarrollo de la civilización humana en los últimos 10.000 años (Cook, 2003; Fagan, 2004). Los impactos del cambio climático sobre las sociedades están bien demostrados por la historia, particularmente las desapariciones de ciudades e incluso civilizaciones por cambios climáticos y degradación medioambiental. Ejemplos clásicos de esto son la degradación por sobreexplotación no sostenible de la isla de Pascua, con la consiguiente degradación de la calidad de vida de sus habitantes; la desaparición de la civilización maya, que parece haber coincidido con un cambio climático brusco, el colapso de la cultura hitita

asociado a una sequía hacia el 1200 a.C., o el abandono de antiguas ciudades en el norte de África debido a la extensión del desierto del Sáhara. Los cambios climáticos siguen propiciando grandes cambios sociales que, a pesar de la mayor estructuración de las sociedades modernas, producen consecuencias relevantes en todos los niveles de la actividad social. El impacto económico del cambio climático se desarrollará de forma específica en otro capítulo, por lo que aquí nos centraremos en sus impactos en otros componentes del ecosistema social.

7.1. El ecosistema social

No es baladí recordar que el cambio global es un hecho social, puesto que tiene sus causas en gran medida en las



Tallos de macroalgas a la venta en el mercado de Puerto Mont (Chile).

Fotografía: C. M. Duarte.

actividades humanas, y porque además son las sociedades globales y específicas, así como las personas que componen esas sociedades, quienes finalmente van a sufrir sus consecuencias bien sea directamente, bien indirectamente a través del cambio del medio biogeofísico. Como hecho social que es conviene aclarar el campo de análisis. Es casi una obviedad recordar que las sociedades están en constante cambio, aunque éste sea en unas ocasiones más evolucionista (lento) y en otras más revolucionario (rápido). La velocidad del cambio en la sociedad es un factor extremadamente relevante para el análisis del impacto social, sobre todo en lo referido a su interrelación con el medio biogeofísico, ya que gran parte del problema del denominado cambio global se está produciendo sobre todo por la impresionante velocidad del

cambio social en las sociedades contemporáneas (el aumento de la demanda de energía y otros recursos naturales, por ejemplo), lo cual produce presiones sobre el medio biogeofísico, cuyas posibilidades de renovación de los recursos y, sobre todo, de “integración” de los residuos tóxicos y peligrosos requieren un tiempo mucho mayor y una velocidad de la presión menor. La figura 7.1 es sólo una muestra de esa presión.

Distinguimos entre efectos y consecuencias sociales del cambio global, puesto que es relevante ir más allá de lo directamente producido por una acción (es decir, los efectos) y tener en cuenta los impactos indirectos y las sinergias, es decir, el resultado en términos de consecuencias. Dentro de las dificultades que conlleva prever cualquier asunto futuro, es más abordable la identificación de los efectos, aunque, aún con sus

Indicador	Unidades	1950	1971	1997	2008
Población	Mil millones de personas	2,5	3,8	5,8	6,7
Megaciudades	De más de 8 millones de personas	2	9	25	36
Alimentos	Producción día, en calorías/persona	1.980	2.450	2.770	3.500
Pesca	Captura anual en millones de toneladas	19	58	91	93
Consumo de agua	Consumo anual agua en millones de toneladas	1.300	2.600	4.200	5.000
Vehículos	Millones de vehículos	70,3	279,5	629	921
Uso de fertilizantes	Millones toneladas	36,5	83,7	140,3	163,2
Bosque húmedo	Índice cobertura forestal	100	85	70	62
Elefantes	Millones de animales	6,0	2,0	0,6	0,5

Figura 7.1. Indicadores de presión creciente de la actividad humana sobre los recursos mundiales.

Fuentes: World Resources Institute, Banco Mundial, UNESCO, UNICEF.

dificultades y cautelas, se precisa identificar las interrelaciones que permitan diagnosticar las posibles consecuencias sociales del cambio global. El impacto, o las consecuencias sociales del cambio global, en definitiva es lo que va a resultar de las interacciones entre los cambios en el medio biofísico y los cambios en el medio social concreto. Sin embargo, esas interacciones casi nunca son directas, pues están también —y principalmente— mediadas por las diversas esferas de la acción social, entre las que se encuentran la organización

social (economía, las relaciones sociales, las normas y valores...) y la tecnología. La figura 7.2 ilustra el complejo socioecológico.

De estas esferas básicas que componen cada sociedad —con más peso unas u otras dependiendo del tipo de sociedad— conviene tener en cuenta que un cambio en una de las esferas incide en todas las demás no de forma sumatoria, sino exponencial. Es por ello que las consecuencias sociales serán —están siendo— diferentes según sean las características concretas de las distintas

sociedades. En algunos casos, el mismo tipo de cambio biogeofísico puede producir consecuencias sociales negativas en unos lugares y positivas en otros¹ (más horas solares, por ejemplo, permiten producir energía solar). Los impactos reales sobre la salud de la población van a estar muy determinados por las condiciones ambientales locales y también por las circunstancias socioeconómicas de esa población (particularmente el sistema sanitario), así como por las opciones que se tomen de adaptación social, institucional, tecnológica y de comportamiento (estilos de vida) para disminuir los riesgos y amenazas a la salud humana. Un caso que ejemplifica muy bien las consecuencias distintas del cambio global es Inglaterra: mientras que en algunas zonas ha aumentado considerablemente el riesgo de inundaciones (valle del Támesis), los agricultores de otras regiones empiezan a aprovechar el clima más favorable y cultivan uvas u olivas.

A pesar de lo anterior, sí que estamos en condiciones de afirmar que a mayor cambio biogeofísico y mayor velocidad en ese cambio, predominarán los efectos negativos en la sociedad. El marco analítico deberá ser entonces las interrelaciones para la vida y desarrollo² de las sociedades humanas, es decir, la “fábrica” social.

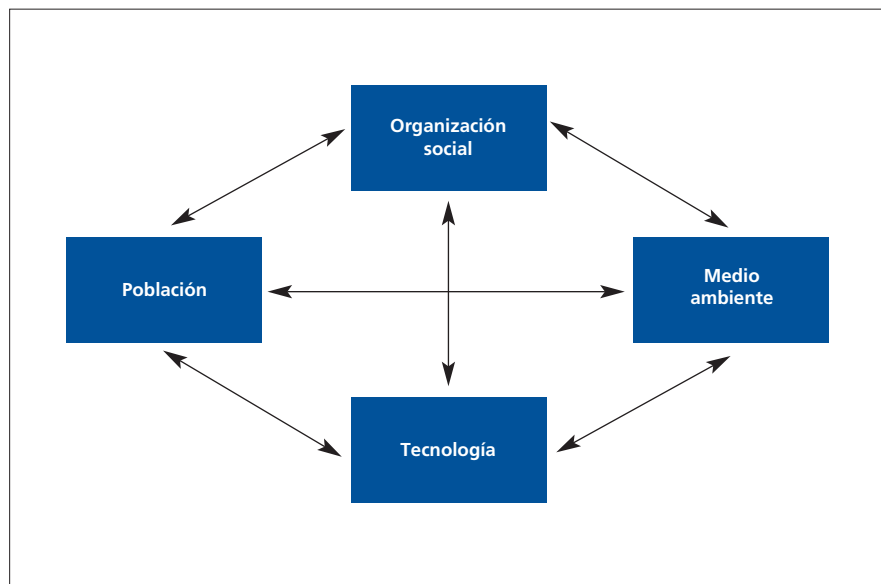


Figura 7.2. Complejo socioecológico

1. La magnitud, duración y reversibilidad de los efectos sociales del cambio global son también aspectos relevantes.
2. Por desarrollo no queremos decir crecimiento económico, pues son conceptos diferenciados.



Gran diversidad de variedades de calabaza a la venta en Montreal (Canadá).

Fotografía: C. M. Duarte.

7.2. Áreas relevantes para la comprensión del impacto social del cambio global

El medio social o ecosistema social, como sistema de interrelaciones para la vida humana, incluye todas las esferas relevantes de la vida de la sociedad, como son:

- La población como base demográfica y su sistema de poblamiento.
- La base económica de esa sociedad.
- La cultura en sentido profundo del término (antropológico), es decir, las formas de organización de la sociedad; los logros culturales materiales (la tecnología, por ejemplo) y no-materiales (simbólicos).

- Todo ello en una interrelación con su base biofísica suministradora de recursos para su subsistencia, bien sea material (alimentos...) o de valores (belleza de un paisaje...).

Por ello, el impacto social del cambio global incluye, al menos, los siguientes aspectos:

1. El impacto en la población como base sociodemográfica:
 - En la esperanza de vida de esa población, centrandó ésta en la salud.
 - En su capacidad de reproducción biológica y en el equilibrio de su estructura social, centrándonos en su crecimiento, edad y sexo.
 - En los procesos migratorios que el cambio global genera.

2. El impacto en la base económica de la sociedad:
 - Riesgos a la subsistencia económica de esa sociedad y a los usos del territorio, en particular sobre el sistema de poblamiento humano.
 - Renta económica y estatus social.
 - Empleo.
 - Tecnología.
3. El impacto en la organización social y la cultura:
 - Estructura social.
 - Educación.
 - Redes de apoyo social.
 - Organización política y social. Sistemas de gobernanza y democracia.
 - Capacidad de resiliencia
 - Normas y valores sociales.
 - Niveles de conflictividad social. Seguridad.
 - Patrimonio cultural.

7.3. El impacto en la población como base demográfica: salud, estructura demográfica y flujos migratorios

El impacto en la salud

La salud humana depende fuertemente de factores físicos (el entorno biogeofísico, la alimentación, la base genética...) aunque históricamente han sido sobre todo los factores sociales (abastecimiento de agua potable;

sistemas sanitarios...) los que han permitido más que duplicar la esperanza de vida de las poblaciones humanas en los países económicamente desarrollados (por ejemplo, de 30 a 80,7 años en España según el Indicador de Desarrollo Humano). El desarrollo de la biotecnología en las próximas décadas

está generando la expectativa de una extensión aún mayor de la esperanza de vida. No ha sido éste el caso de los países empobrecidos, anclados en tan sólo una media de 51 años de esperanza de vida³. Actualmente, el cambio global tiene una incidencia negativa sobre la salud humana, que se resume en lo siguiente:

- a) Cambios en la morbi-mortalidad⁴ por razón de la temperatura en sí misma y por la influencia del cambio climático en la producción de alimentos.
- b) Efectos en la salud y mortalidad relacionados con acontecimientos meteorológicos extremos (tormentas, tornados, huracanes y precipitaciones extremas).
- c) Aumentos de los efectos negativos asociados a la contaminación y los residuos.
- d) Enfermedades transmitidas por los alimentos, el agua, por vectores infecciosos y roedores.

Los factores sociales y económicos determinantes de la salud y afectados por el cambio climático se resumen en la figura 7.3.

Muchas de las investigaciones sobre la salud en este campo se han centrado en estudiar los efectos de las olas de calor (por ejemplo, las miles de muertes que se produjeron en Europa en el verano de 2003⁵, figura 7.4), o de la disminución en la capa de ozono (del 15 al 20% en la incidencia de cáncer de la piel en poblaciones de piel fina; cataratas y otras lesiones oculares pueden aumentar del 0,6 al 0,8% por cada 1% de disminución del ozono; y

Determinantes sociales de salud	Cómo influyen los factores sociales en la salud	Relación con el cambio climático: capacidad adaptación, vulnerabilidad
Renta y posición social	La salud mejora cuanto mayor sea el nivel de renta y más alta la posición social. Nivel social bajo y peores rentas están asociados con peor salud	La capacidad de adaptación de los individuos, comunidades, regiones y naciones ricas serán mayores que las de los más pobres
Grupos sociales de referencia	Familia, amigos y comunidad están relacionados con una mejor salud. La salud más deficiente es más común en las comunidades fragmentadas	Los mejores grupos de referencia (formales e informales) permitirán tanto a individuos como a comunidades sobrellevar más eficazmente el cambio climático: tienen más capacidad de respuesta
Educación	Mejor educación está relacionada con mejor salud. Peor educación con peor salud. Conocimiento cultural	Una mejor educación proporciona aptitudes individuales para informarse y comprender, así como adaptarse. Mayor cuanto más ingresos
Trabajo / Condiciones laborales	Mala salud está asociada con desempleo y trabajos y condiciones laborales estresantes	Algunos tipos de desempleo incrementan el riesgo de exposición a condiciones climáticas extremas. Mayor seguridad en el empleo está relacionada con las rentas y los grupos de referencia
Entorno social	Los valores y normas sociales influyen en la salud y el bienestar de los individuos y las poblaciones	Algunos son más adaptables que otros; también los hay sin capacidades de adaptación
Género	La selección de determinados roles sociales, rasgos personales, actitudes, comportamientos, valores, influencias, son atribuidos socialmente a los dos sexos	No está bien definido en el contexto del cambio climático, excepto en países desarrollados

Figura 7.3. Factores socioeconómicos determinantes de la salud en relación al cambio climático.

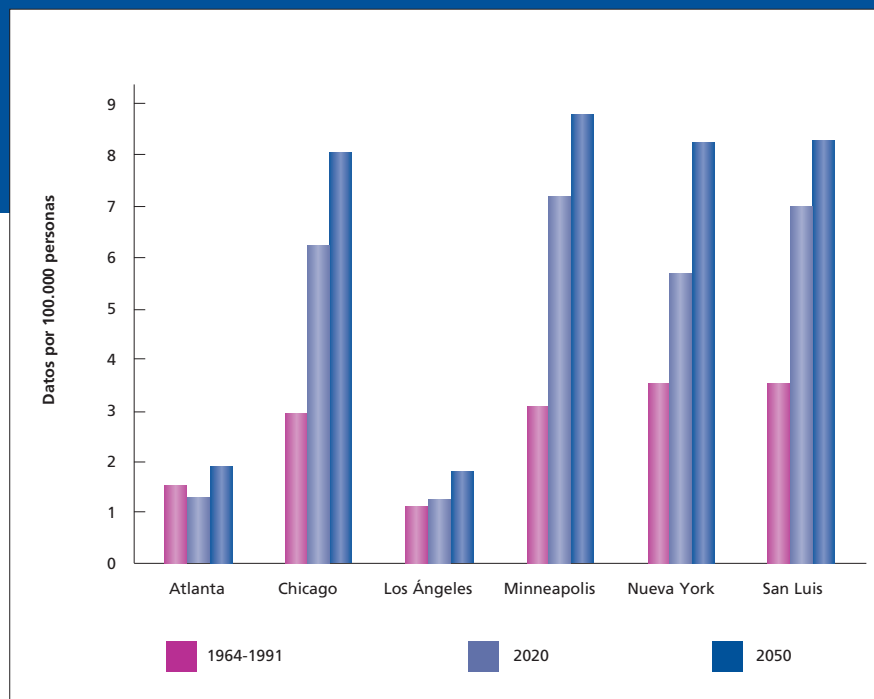
3. Indicador de Desarrollo Humano 2009 (datos 2007).

4. La morbi-mortalidad se define como la cantidad de personas que mueren en un lugar y un periodo de tiempo determinados en relación al total de la población de dicho lugar.

5. Para el caso de España, el Centro Nacional de Epidemiología cifra en 6.500 el número de muertes atribuibles a la ola calor del verano de 2003. Para Europa se calcula entre 27.000 y 40.000 (directa e indirectamente)

Figura 7.4. Mortalidad por olas de calor.

un aumento de la vulnerabilidad en algunas enfermedades infecciosas como resultado de la supresión de la inmunidad causada por la radiación UVB) (según estudios de la Clínica Universitaria de Bonn, Alemania). Conviene destacar que existen muchos más aspectos que hay que tener en cuenta en clave de salud pública para poder prevenirlos, como son los efectos de las inundaciones, y de forma más cotidiana, los efectos de los riesgos en los sistemas alimentarios, principalmente sobre los más pobres (alrededor de 852 millones de habitantes, la mayoría niños, padecen hambrunas)⁶. Un aumento de la temperatura de 3°C supondría un incremento en torno al 10-20% de los habitantes en situación de hambruna. Se prevé que este aumento se produzca principalmente en el África subsahariana y en algunas regiones del Asia meridional y de Centroamérica, especialmente en los



niveles de desnutrición infantil (Mapa Impacto Cambio Climático, Centro Hadley de la Oficina Meteorológica Británica, 2009).

Además, junto al impacto negativo, también se producirían algunas mejoras: inviernos menos fríos en algunas regiones, y el calentamiento y las sequías que en algunas zonas pueden disminuir el ciclo vital de los mosquitos y su periodo de transmisión. Sobre todo

para Europa central y Escandinavia, el informe del IPCC prevé notables mejoras del clima: veranos más estables y calurosos, prolongación del periodo anual de cultivos (IPCC, 2007).

Respecto al aumento de la temperatura, cada región del planeta tiene un rango de temperatura óptimo en el que los índices de mortalidad se mantienen bajos. Cuando estos niveles aumentan y se alejan de la zona

6. Los aspectos distributivos sociales del impacto del cambio global son asuntos muy relevantes a tener en cuenta, ya que, aunque el impacto también es global, son los países pobres y los grupos sociales más pobres y vulnerables los más afectados.

País	Riesgos claves	Medidas de mitigación
Alemania	Aumento de la mortalidad por calor, aumento en encefalitis viral, impactos negativos para el sistema de salud pública	Mejorar los sistemas de información pública, sistemas de advertencia, sistemas de planificación de emergencias, sistemas de aire acondicionado para edificios, creación de fondos de reserva
Australia	Aumento mortalidad por olas de calor, posibles muertes por inundaciones, aumento de diarrea para población indígena, posible aumento de las zonas amenazadas por el paludismo y malaria, aumento de migración medioambiental desde las islas pacíficas	Todavía no han sido tomadas en consideración
Bolivia	Aumento de malaria y de leishmaniasis. La población indígena afectada por el aumento de enfermedades de infección	Todavía no han sido tomadas en consideración
Canadá	Aumento de mortalidad por calor y por enfermedades que tienen su origen en la contaminación del aire, aumento de enfermedades infecciosas transmitidas por roedores e insectos, problemas con la contaminación de pescado nacional e importado, aumento de alergias, peligros sobre todo para poblaciones en el norte de Canadá	Sistemas de supervisión de enfermedades infecciosas, planes de emergencia, sistemas de advertencia, regulaciones del uso de tierra, mejora de los sistemas de abastecimiento y de tratamiento de aguas, medidas para reducir diferencia entre temperatura urbana y del campo
España	Aumento de mortalidad por calor y por contaminación aérea, posibles cambios en la infecciones por insectos o roedores	Sistemas de advertencia y de concienciación de olas de calor, supervisión y adaptación de las políticas de salud pública
Finlandia	Leve de aumento mortalidad por calor, cambio de las fases fenológicas, aumento de riesgo por alergias, leve reducción de la mortalidad en invierno	Concienciación y formación de médicos
India	Aumento de enfermedades infecciosas, extensión de las zonas afectadas por malaria	Sistemas de control, medidas para controlar infección por insectos, educación pública
Japón	Aumenta la tasa mortalidad por calor, riesgo para personas alérgicas contra el polen del cedro japonés, aumento del riesgo de contaminación de alimentos	Implantación de un sistema de emergencia para olas de calor
Nueva Zelanda	Aumento de infecciones transmitidas por la alimentación (contaminación de alimentos), cambios en condiciones alérgicas, problemas a consecuencia de inundaciones y tormentas, aumento leve de mortalidad por calor	Sistema para asegurar la calidad de la alimentación, de información para la población y los agentes de salud, sistemas de protección contra inundaciones, supervisión contaminación por insectos
Países Bajos	Aumento de mortalidad por calor, por contaminación del aire, enfermedad Lyme, contaminación de alimentos y aumento de sensibilidad alérgica	Todavía no han sido tomadas en consideración
Panamá	Aumento de enfermedades transmitidas por insectos, en las ciudades problemas de salud por alto nivel de ozono, aumento de la malnutrición	Todavía no han sido tomadas en consideración
Portugal	Aumento de mortalidad por calor y malaria, de enfermedades contagiadas por el agua y la comida, aumento de la fiebre del Nilo occidental, de la enfermedad de Lyme y de la fiebre botonosa mediterránea, una reducción del peligro de la enfermedad leishmaniasis en algunas zonas	Mejorar sistemas de aire acondicionado, sistemas de educación y de información, así como sistemas de advertencia de olas de calor, sistemas de detección de enfermedades infecciosas
Reino Unido	Riesgos para la salud por mayor frecuencia de inundaciones, aumento del riesgo de mortalidad por calor, aumento de la exposición a mayores niveles de ozono	Mayor concienciación
Suiza	Aumento mortalidad por calor, extensión de zoonosis, aumento de encefalitis viral	Informaciones sobre temperaturas, sistema de advertencia, estrategia de reducción de emisión de gases invernaderos, estrategia para reducir la emisión de otros gases nocivos, creación de un grupo de trabajo sobre salud y clima
Tayikistán	Aumento mortalidad por olas de calor	Todavía no han sido tomadas en consideración

Figura 7.5. El impacto del cambio climático en la salud, según países.

Fuente: IPCC, 2007.

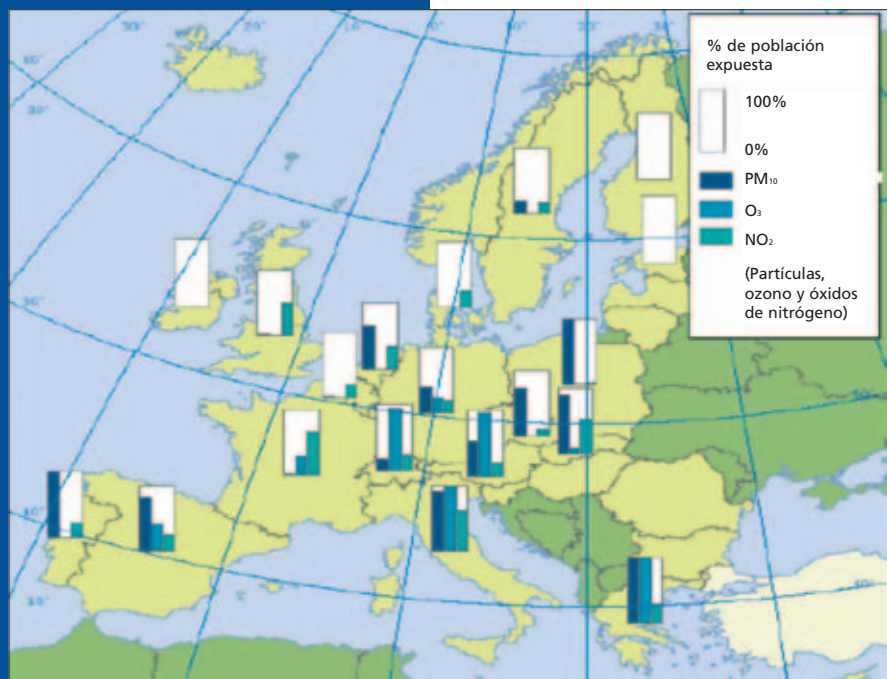


Figura 7.6. Exposición de la población urbana a concentración de contaminantes por encima de los valores límite, en los países de la Unión Europea (UE15), 1999.

considerada confortable —sobre todo si es un cambio rápido— la mortalidad se eleva. En cuanto a las inundaciones, sus efectos incluyen la pérdida de vidas, de viviendas, el deterioro de las condiciones higiénicas, la destrucción de los cultivos y la formación de un ambiente propicio a la propagación de infecciones, entre otros. La malnutrición y los trastornos mentales son las consecuencias más habituales relacionadas con estas catástrofes. El cambio global —y en particular el cambio climático— repercute además en la productividad agrícola, ganadera y pesquera, previéndose un incremento del 5-10% en las personas desnutridas, sobre todo en los trópicos.

Los conflictos, las migraciones y los flujos de refugiados, a los que también afecta en mayor o menor grado el

Número de personas al año	1980	2000
Enfermedades de la piel (se excluyen los tumores)	183	944
Tumor maligno del aparato respiratorio	8.771	17.363
Melanoma maligno de piel	181	701
Otro tumor maligno de piel	350	549
Leucemia	1.776	2.881
Cáncer de tejido conjuntivo	187	404
Melanoma cutáneo	166	645
Tumor de ovario	625	1.605
Linfoma NO Hodking	368	1.891
Mieloma múltiple	481	1.511

Figura 7.7. Muertes en las que habrían podido influir causas medioambientales, 1980 y 2000.

Fuente: Instituto Nacional de Estadística (INE), *La sociedad española tras 25 años de Constitución*, 2003.

cambio global, aumentan el riesgo de contraer enfermedades infecciosas, de sufrir problemas mentales y lesiones, así como de muertes por conflictos violentos. Se sabe que muchas enfermedades infecciosas transmitidas por vectores, alimentos y agua son sensibles a cambios de las condiciones climáticas (figuras 7.5, 7.6 y 7.7). En la mayoría de las predicciones se llega a la conclusión de que, en ciertos escenarios de cambio climático, aumentaría la gama geográfica de transmisión posible de paludismo y de dengue, que en la actualidad amenaza al 40 a 50% de la población mundial. En todos los casos, la aparición real de la enfermedad dependerá en gran medida de las condiciones ambientales locales, circunstancias socioeconómicas e infraestructuras de salud pública, por lo que son clave las políticas preventivas y de adaptación.

Por lo que respecta a España⁷, cabe esperar un aumento en la morbi-mortalidad causada por las olas de calor, más frecuentes en intensidad y duración en los próximos años. Además, por su localización geográfica, es probable el aumento de la incidencia de enfermedades vectoriales transmitidas por mosquitos (dengue, enfermedad del Nilo occidental, malaria). Destaca el aumento de las

enfermedades conectadas a la contaminación ambiental por residuos y productos tóxicos (entre ellas, cánceres), así como alergias y asma. Respecto a cada uno de los impactos negativos previstos en la salud, hay una gama de opciones posibles de políticas de adaptación social, institucional, tecnológica y de comportamiento colectivo e individual para reducir tal efecto. El reforzamiento de la infraestructura de salud pública y una gestión orientada hacia la salud medioambiental son clave. Esto incluye la regulación de la calidad del aire y las aguas, la seguridad alimentaria, la ordenación de las aguas superficiales, así como el diseño urbano y de las viviendas para crear condiciones más sanas. La información y preparación de las sociedades para el cambio global, y en particular para las contingencias que se presenten, es una de las medidas más importantes a desarrollar.

El impacto en la demografía

Las migraciones de población desempeñan un papel clave en la mayoría de las transformaciones sociales contemporáneas⁸. Las migraciones son simultáneamente el resultado del cambio global (económico, ecológico, social) y

una fuerza poderosa de cambios posteriores, tanto en las sociedades de origen como en las receptoras. Sus impactos inmediatos se manifiestan en el nivel económico, aunque también afectan a las relaciones sociales, la cultura, la política nacional y las relaciones internacionales. Las migraciones conducen a una mayor diversidad étnica y cultural en el interior de los países, transformando las identidades y desdibujando las fronteras tradicionales.

Las migraciones internacionales van en aumento debido a las tasas demográficas⁹ y a la desigualdad en los niveles de renta, por lo que es previsible un fuerte aumento de los flujos migratorios desde los países del norte de África hacia los del sur de Europa, desde Latinoamérica hacia los Estados Unidos y España, desde el este y el suroeste asiático hacia Norteamérica y tal vez hacia Japón, y desde algunas de las antiguas repúblicas soviéticas hacia Rusia.

Pero los movimientos migratorios también tienen lugar dentro de los propios países. En Estados Unidos, los desplazamientos hacia las zonas costeras del Pacífico y del golfo de México han sido continuos en las últimas décadas, de manera que más del 50% de la población reside en una franja costera de 70 km. En China se están

7. Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático. Ministerio de Medio Ambiente / Universidad Castilla-La Mancha.

8. Como siempre ha sido en la historia de la humanidad, aunque ahora a ritmos y dimensiones mayores.

9. En los próximos cincuenta años, la población mundial sumará tres billones más de personas, principalmente en las zonas del mundo que tienen ya fuertes cargas de enfermedades y daños relacionados con el clima.

produciendo fuertes movimientos migratorios, desde las zonas más áridas y pobres del interior hacia las provincias del litoral, por razones económicas y sociales, pero en las que subyace la precaria situación ambiental del interior. Pero, con mucho, el fenómeno que se repite mundialmente es la emigración de las zonas rurales a las áreas metropolitanas así como la expansión de éstas¹⁰.

La relación población-entorno es particularmente significativa en los casos de migraciones incontroladas (debido a políticas gubernamentales como es el desarrollo de infraestructuras) hacia zonas delicadas desde el punto de vista ambiental. Las subvenciones otorgadas por el gobierno de Estados Unidos, por poner un ejemplo, desempeñaron un papel importante en el rápido desarrollo urbano de las “islas barrera”¹¹ en zonas costeras, aun cuando son zonas poco aptas para el asentamiento de la población por los riesgos asociados a huracanes y temporales y porque cumplen una importante función preventiva de daños por acontecimientos meteorológicos. En Filipinas, las subvenciones estatales para desarrollar las regiones boscosas desembocaron en migraciones hacia esas áreas, llevando a un incremento de la deforestación y los riesgos y pérdidas de vidas por las

consiguientes riadas. Los daños en el estado de Luisiana, particularmente Nueva Orleans, por el huracán Katrina de 2005, parecen haberse incrementado debido a la desaparición de marismas en el delta del Mississippi (Tibbetts, 2006). El tsunami del sureste asiático del 26 de diciembre de 2004 puso de manifiesto cómo el hecho de haber conservado los bosques de manglares entre la costa y las zonas pobladas tuvo como consecuencia menos muertes en esas poblaciones comparativamente a aquellas donde la protección de los manglares había desaparecido (Kathiresan y Rajendran, 2005), de forma que la mortalidad asociada a perturbaciones se ve moderada por la presencia de ecosistemas en buen estado de conservación. Un aspecto adicional relevante es el referido a las diferencias en el impacto según género. El tsunami asiático de 2004 puso de manifiesto que los desastres afectan de forma diferente a los hombres que a las mujeres. En Aceh Besar los supervivientes hombres superaron a las supervivientes mujeres en una ratio de 3:1; en los distritos norte de Aceh, el 77% de las muertes fueron de mujeres (Oxfam). Ello se debe sobre todo a los diferentes tipos de trabajo de hombres y mujeres. Igualmente ocurre con los niños, los cuales son particularmente vulnerables a estos desastres.

Algunos actores de la política internacional han propuesto la introducción del término de “refugiado medioambiental”. No obstante, este término no ha conseguido un consenso pleno ya que representa una explicación demasiado simplista de los motivos de migración, que en la mayoría de los casos son múltiples. Además, hay que tener en cuenta que el término “refugiado”, en la política internacional clásica es un término con uso muy restringido que solamente se aplica a personas perseguidas por motivos políticos o éticos. Véase el resumen de la discusión en IPCC 2007.

7.4. El impacto en la base económica de la sociedad: economía, usos del territorio y asentamientos humanos

Los asentamientos humanos (núcleos rurales y urbanos, viviendas, infraestructuras...) están afectados por el cambio global por razón de:

- Cambios en la productividad o en la demanda del mercado, en cuanto a los bienes y servicios del lugar.
- Aspectos directos de consecuencias del cambio global sobre la infraestructura

10. Fundación Biodiversidad y Ministerio de Medio Ambiente.

11. La isla de Ocracoke, en la costa atlántica de Carolina del Norte (Estados Unidos), por ejemplo.

material (incluidos los sistemas de transmisión y distribución de energía), edificios, servicios urbanos (incluidos los sistemas de transporte) y determinadas industrias (tales como agroindustria, turismo, y construcción).

- Cambios indirectos sociodemográficos, como hemos señalado anteriormente. El riesgo directo que afecta en más partes del mundo a los asentamientos humanos es el de inundaciones y movimientos de tierra, agravados por el aumento previsto de la intensidad de las lluvias y, en las zonas costeras, por la subida del nivel del mar e incremento de temporales y huracanes. Este riesgo es mayor para los asentamientos localizados en las vertientes de los ríos y mares, pero la inundación urbana puede ser un problema en cualquier zona en la que haya una escasa capacidad de los sistemas de alcantarillado, suministro de agua y gestión de residuos, es decir, los núcleos y sociedades con menos recursos infraestructurales. En tales áreas, son altamente vulnerables los barrios con ocupación ilegal del territorio y otros asentamientos urbanos officiosos con elevada densidad de población, sin acceso a refugios para evacuación, poco o ningún acceso a recursos tales como agua potable y servicios sanitarios públicos, y, en general, escasa

capacidad de adaptación. Algunos ejemplos al respecto son los siguientes. En Nicaragua el 80% de las personas que perdieron su hogar debido al huracán Mitch (octubre 1998) vivían en la línea de la pobreza o por debajo de ella antes de la tormenta. En la capital de Honduras (Tegucigalpa) una barriada entera que fue arrastrada al río Choluteca albergaba a vendedores ambulantes del mercado local que habían construido chabolas por falta de viviendas asequibles. La deforestación ha provocado que Haití, uno de los países más pobres del mundo, sea enormemente vulnerable a huracanes devastadores, que a finales de 2004 provocaron tremendas riadas y avalanchas de barro (4.000 muertos), caso paralelo al de las Islas Filipinas. De los daños que pueden causar los desastres naturales, puede dar una idea el terremoto de 1995 en Kobe (Japón) con resultado de 6.350 personas muertas y más de 100.000 millones de dólares en daños. En Europa, las inundaciones constituyen el 43% de todos los desastres acontecidos en el periodo 1998-2002. En este periodo, Europa sufrió alrededor de 100 inundaciones graves con más de 700 víctimas mortales, el desplazamiento de aproximadamente medio millón de personas y numerosas pérdidas económicas.



Plantación de plátanos en el centro de un pueblo en la isla de La Palma.

Fotografía: F. Valladares.



Cordón de dunas en el Parque Nacional de Doñana.

Fotografía: F. Valladares.

*El Libro Verde de la Comisión Europea sobre Adaptación al Cambio Climático en Europa*¹² calcula el coste de no actuar en hasta 20.000 millones de euros de pérdidas anuales, sólo por el incremento del nivel del mar. Unas políticas regionales de adaptación

podrían reducir estos costes más del 75%. La adaptación exigirá reforzar todas las infraestructuras existentes con un coste del valor del 10% de estas infraestructuras. Londres ha constituido una alianza público-privado para acometer estas inversiones. Sobre dicho modelo, se ha calculado los costes que tendría en Bilbao. El resultado inquietante, sobre los costes de los años 80 actualizados, bajo la perspectiva que las precipitaciones serán más intensas y frecuentes, calcula hasta 400 millones de euros de pérdidas anuales¹³. El Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino destina para adaptación 5.000 millones de euros sólo para algunos de los kilómetros más vulnerables de costa. El nuevo escenario del cambio global está requiriendo rehacer los mapas de zonas inundables.

Los asentamientos humanos sufren en la actualidad otros importantes problemas ambientales, que pudieran agravarse en regímenes de temperatura más elevada y de mayor precipitación, principalmente los relacionados con el agua y la energía, así como la infraestructura, el tratamiento de residuos y el transporte. La rápida urbanización de zonas bajas costeras, tanto en el mundo económicamente desarrollado como en el mundo

12. http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/es/com/2007/com2007_0354es01.pdf

13. Ingurumena (2007): Metodología para valorar los costes de los impactos del Cambio Climático en el País Vasco. El caso Bilbao. Bilbao 2007.

empobrecido, está produciendo un aumento considerable de la densidad de la población y de los bienes humanos expuestos a extremos climáticos en las costas, como son los ciclones tropicales. Las previsiones basadas en modelos del promedio de personas al año que pudieran ser objeto de inundación por tormentas en la costa, se multiplica varias veces (75 veces 200 millones de personas, en escenarios de aumento del nivel del mar de 40 cm al año 2080, respecto a escenarios sin dicho aumento). Los daños potenciales a las infraestructuras de las zonas costeras, como resultado del aumento del nivel del mar, han sido calculados en valores correspondientes a decenas de miles de millones de dólares para países como Egipto, Países Bajos o Vietnam, por ejemplo.

En la Cumbre de Nairobi en 2006 (Conferencia sobre Cambio Climático de la ONU) se abordó el tema de adaptación al cambio climático. ¿Cómo financiar y transferir recursos a adaptación? Al Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF) se suman los fondos del Banco Mundial o la Ayuda Oficial al Desarrollo. Una propuesta es destinar una parte de los beneficios de los proyectos MDL (Mecanismos de Desarrollo Limpio, del Protocolo de Kioto) a adaptación, un 2%, pero que

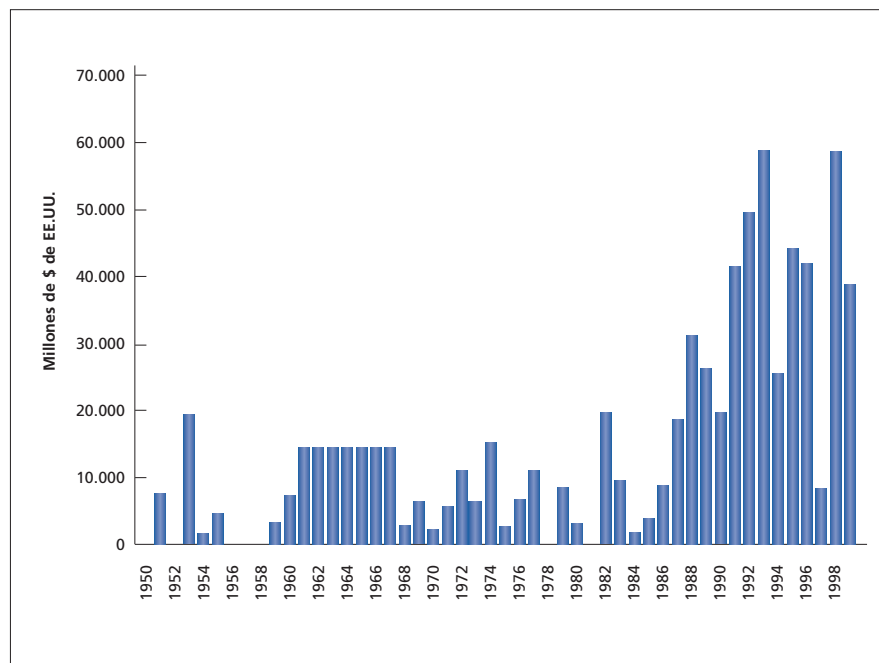


Figura 7.8. Pérdidas económicas por catástrofes naturales, 1950-1999.

Fuente: IPCC 2007.

representa hasta 2012, 950 millones¹⁴. El informe Stern calcula, sólo para el caso de la India, pérdidas de 540.000 millones. En la reunión de Bali de la ONU se dio un paso más en las políticas de adaptación, marcando el objetivo en 3,5 billones. Pero no todos los impactos provienen del cambio climático. Se edifica allí donde nunca se había edificado antes. Se requiere un enfoque de cambio global.

Los asentamientos humanos con poca diversificación económica, y en los que un elevado porcentaje de los ingresos proviene del sector primario sensible al clima (agricultura, silvicultura y pesca) son más vulnerables que aquellos con economías más diversificadas. Los más pobres de los pobres ocupan las áreas con más restricciones, limitaciones y de mayor fragilidad ambiental; esto es así en todo el mundo, incluso en los países

14. Benito Mueller: International Adaptation Finance: The Need for an Innovation and Strategic Approach. Oxford Institute for Energy Studies, junio 2008, en: <http://www.oxfordenergy.org/pdfs/EV42.pdf>



Barrio pobre y densamente poblado en Ammán, capital de Jordania, situada en un clima muy árido.

Fotografía: F. Valladares.

económicamente desarrollados, como se pudo constatar en el caso de los daños del huracán Catarina del 2005 en la ciudad de Nueva Orleans (EE.UU.). Se trata, por lo tanto, de ecosistemas con muy poca flexibilidad, lo que significa que sus opciones de uso productivo así como su capacidad natural de producción es baja, de tal manera que cualquier alteración de las variables que lo mantienen en un equilibrio delicado, resultan en una aceleración de su dinámica degradante. En este contexto, cada vez que se produce un desequilibrio en estos ecosistemas —con independencia de las razones que lo provocaron— la población que los ocupa y utiliza, por definición, ejerce una mayor presión sobre los recursos, potenciando así los procesos de degradación. Ello a su vez empobrece aún más a la población, produciéndose de este modo un auténtico círculo vicioso. Según el informe *El cambio climático en España. Estado de Situación* el turismo es un sector económico particularmente relevante a tener en cuenta en cuanto a su vulnerabilidad al cambio global¹⁵.

Al ser un sector muy dependiente de las condiciones climatológicas y biofísicas en general, el turismo en España (con un PIB de más del 11%) se verá afectado por razón de la posible disminución de la demanda, del

deterioro de la oferta y de los criterios de los operadores del mercado. No obstante, el sistema turístico español se caracteriza por ser un sistema dinámico que ha sido capaz de generar respuestas de adaptación a los cambios. Sin embargo, el grado de deterioro que existe en algunos destinos turísticos tradicionales muestra un escaso margen de maniobra, y cualquier cambio puede empeorar aún más las actuales condiciones ya de por sí desequilibradas. Nuevos factores asociados al cambio global —como la proliferación de medusas en distintas áreas del océano y cuya incidencia en las costas mediterráneas españolas parece ir en aumento— se han vinculado a la conjunción de la sobrepesca, que ha eliminado predadores y competidores de las medusas, y al aumento de la temperatura del mar, que acelera su crecimiento.

Entre los espacios potencialmente afectados por el cambio global destacan los siguientes:

- Los espacios naturales que acogen turismo; los destinos turísticos al frente mediterráneo, el golfo de Cádiz y los archipiélagos balear y canario; los espacios que actualmente acogen al turismo de invierno, por falta o escasez de nieve; los espacios

15. VV.AA. (2007). El cambio climático en España. Estado de situación. Ministerio de Medio Ambiente.

de interior y litoral, en todos ellos se pueden generar cambios en los calendarios de actividad al producirse una disminución de las aptitudes climático-turísticas en los meses centrales del verano por calor excesivo y un aumento de la potencialidad en las interestaciones (primavera y otoño). Algo similar puede suceder en determinadas zonas de montaña, aunque en sentido inverso: la disminución de la temporada turística de invierno por falta de nieve puede verse compensada por el alargamiento de la estación estival. Para las costas gallega y cantábrica, el cambio de temperatura puede significar una mejora considerable de las oportunidades del turismo de playa.

- Dos asuntos destacaríamos como vulnerables: las reservas de agua dulce disponibles en los humedales y acuíferos costeros (como la Albufera de Valencia), que están sufriendo intrusión de agua salada, agravando una situación ya crítica en la actualidad, derivada de problemas de abastecimiento en determinados lugares turísticos. Al aumentar los procesos de erosión, se pueden ver alteradas todas las infraestructuras de primera línea de mar (playas, paseos

marítimos, diques, espigones, puertos deportivos, entre otros). Los siguientes datos básicos ilustran la importancia del asunto: las costas españolas acogen a más de 24 millones de habitantes (cerca del 60% de la población), a lo que hay que añadir casi 55 millones de turistas que nos visitan cada año.

- Otros sectores económicos que se han estudiado con relación al cambio global son la industria y el sector de seguros. Se sabe que modificaciones en la disponibilidad de los recursos hídricos afectarían a la industria en general, aunque los sectores más perjudicados serían la siderurgia, pasta y papel, químico, alimentación, textil y petróleo. Por su parte, el sector de las aseguradoras puede ser, económicamente hablando, uno de los que más rápida e intensamente se vea afectado por los cambios climáticos, al requerir aumentar las primas de seguro y/o verse incapacitado financieramente para asumir grandes riesgos, en sociedades que requieren cada vez mayores niveles de seguridad, como es el caso de las económicamente desarrolladas. En las zonas desarrolladas del Ártico, y donde el *permafrost* (capa del suelo permanente helada) es abundante en hielo, será necesario prestar particular

atención a mitigar los impactos perjudiciales del deshielo, tales como daños graves a los edificios y a la infraestructura de transporte. La infraestructura industrial de transporte y comercial es en general vulnerable a los mismos peligros que la infraestructura de los asentamientos urbanos.

En la edificación, la repercusión del cambio global conlleva nuevas necesidades para atender los aspectos de habitabilidad de los edificios, que requieren instalaciones de climatización y ventilación que, a su vez, repercuten sobre el microclima de la localidad¹⁶.

Algunos sistemas de producción y distribución de energía pueden sufrir impactos adversos que reducirían los suministros o la fiabilidad de los mismos, mientras que otros sistemas energéticos podrían beneficiarse (por ejemplo, la energía solar y eólica en algunos casos).

Entre las posibles opciones de adaptación destacan la planificación¹⁷ de los asentamientos poblacionales y de su infraestructura¹⁸ y del emplazamiento de instalaciones industriales y la adopción de decisiones similares a largo plazo, de forma que se reduzcan los efectos adversos de sucesos que son de escasa

16. Calefacciones y aires acondicionados están produciendo también problemas de salud como, por ejemplo, legionelosis.

17. La planificación territorial (por ejemplo, el urbanismo, que es algo más que la construcción de viviendas) está en gran desuso en España.

18. Un ejemplo de adaptación al respecto de las viviendas es la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación, que establece las exigencias básicas para que el sector de la construcción se adapte a la estrategia de sostenibilidad energética y medioambiental.



Marismas del Parque Nacional de Doñana vistas desde el palacio.

Fotografía: F. Valladares.

probabilidad (aunque creciente), pero que conllevan grandes consecuencias (y quizá están en aumento).

En 2006, el Reino Unido publicó el *Informe Stern* (*Stern team, 2006*) que evalúa el coste económico del cambio climático en hasta un 20% de la economía mundial, y urge a desarrollar actuaciones de mitigación y adaptación que permitirían disminuir fuertemente ese impacto con una inversión de tan sólo un 1% del PIB mundial. Este informe, que contiene inevitablemente importantes incertidumbres, pone de manifiesto el importante coste económico del cambio climático y la necesidad de actuar sin más dilación

para minimizar los impactos negativos asociados. También la Unión Europea ha evaluado los posibles daños económicos del cambio climático, lo que demuestra que se está introduciendo una nueva perspectiva en la discusión¹⁹.

7.5. El impacto en la organización social: estructura social y política, conflictos, normas y valores sociales

El cambio global conllevará también un impacto destacable en diversos aspectos de la organización social, así como en las normas y valores sociales, extendiéndose a la gobernabilidad de las sociedades y el desarrollo de la democracia.

Concretamente, la desigualdad social aumenta también por razón del cambio global, tanto en lo que se refiere a los países entre sí (países de desarrollo alto/países de desarrollo bajo), como a lo referido a las desigualdades sociales en un mismo país (rentas, acceso a los recursos, impactos de desastres). Los riesgos biogeofísicos que conlleva el cambio global afectan en mayor medida a los sectores más vulnerables de todas las sociedades (los pobres, los ancianos, los niños, las mujeres, los débiles...) ya

que cuentan con menos recursos no sólo económicos, sino también de información, de educación e incluso del necesario ánimo y autoestima, para prevenir y mitigar los efectos del cambio global. Esta desigualdad social se manifiesta en virtualmente todos los capítulos de impacto que se están abordando en este análisis.

En cuanto a las normas y los valores sociales, conviene recordar que éstos son instrumentos (“caja de herramientas”) adaptativos que crean, cambian y desarrollan las sociedades para preparar la acción social a los cambios necesarios, pero que no siempre estos instrumentos han respondido al cambio rápido.

Aunque la propia historia de la humanidad es un ejemplo extraordinario de adaptación, existen también testimonios que corroboran el colapso de civilizaciones por razones medioambientales a los que no quisieron o no supieron adaptarse (la isla de Pascua, al sur del Pacífico, por ejemplo, fue una civilización que dependía de los árboles para todas las facetas de su supervivencia, y aun así, taló hasta el último, en una espiral hacia el colapso, junto con la guerra y el canibalismo). No sería riguroso trasladar automáticamente ese tipo de comportamiento a las sociedades

19. AEMA (2004). “Impacts of Europe’s changing climate”, *EEA Report No. 2/2004*, http://reports.eea.europa.eu/climate_2_2004/en

Glaciar bajo una gruesa capa de cenizas volcánicas en Puerto Foster, Isla Decepción, Antártida.

Fotografía: C. M. Duarte.

actuales, pero se pueden ilustrar los casos de Ruanda, de la isla de Hispaniola, de ciertas zonas de China y de Australia con riesgos en esa línea. Es por ello relevante el estudio del impacto del cambio global sobre estas esferas de la sociedad, aunque aún estamos lejos de contar con un corpus de conocimiento científico y empírico satisfactorio al respecto.

Un caso actual, con consecuencias legales, es el de los Inuit del Ártico (Conferencia Circumpolar Inuit, ICC), que han presentado una querrela legal contra el gobierno de Estados Unidos sobre la base de que las emisiones de gases invernadero de este país, que están incidiendo en el cambio climático, están dañando profundamente su forma de vida y su cultura²⁰. Esta petición es sólo uno de los casos legales o casi legales que se han presentado contra el gobierno de Estados Unidos y otros países, basándose en el cambio climático.



Los conflictos sociales —incluyendo las guerras como expresión extrema de los conflictos— están también aumentando por razón del cambio global. No es casual que el concepto clásico de seguridad se haya ampliado a las cuestiones medioambientales, hasta el punto de llegar a plantearse su importancia, para algunos analistas, por encima incluso del terrorismo

internacional (European Security Strategy, 2006).

Y es que el cambio global es un factor de aumento de la conflictividad social entre países y dentro de cada país, por razones varias, entre las que se encuentra el acceso a recursos naturales básicos como el agua, las tierras agrícolas, los bosques, las pesquerías. Esto sucede en el caso de grupos que

20. La petición la han hecho a la Comisión Interamericana de Derechos Humanos.

Grandes icebergs desprendidos tras la fragmentación de la Placa de hielo Wilkins en la Península Antártica. fotografía tomada en febrero de 2009.

Fotografía: G. Pearson.





dependen muy directamente del buen estado y productividad de la fuente de recursos (campesinos, pastores nómadas, ganaderos, industrias extractivas), pero también en los países económicamente desarrollados. A la inversa, esa conexión pone de manifiesto que la gestión adecuada de los recursos naturales y el medio ambiente puede construir confianza entre los países y contribuir a la paz, facilitando la necesaria cooperación para atravesar las líneas de tensión política. La violencia en países como Brasil, México, Haití, Costa de Marfil, Nigeria, Ruanda, Pakistán y Filipinas está impulsada en parte por estos factores. Según Diamond (2004), el importante deterioro ambiental que sufre el país jugó un papel destacable en el genocidio de Ruanda (entre 800.000 y 1.000.000 de víctimas). Pero esa violencia no es exclusiva de los países empobrecidos, produciéndose igualmente en los económicamente desarrollados.

El agua es ya un elemento clave en muchas de las guerras. Las aguas del río Jordán fueron una de las principales causas de la guerra árabe-israelí de 1967. Líbano ha acusado hace tiempo a Israel de desear apropiarse de aguas del río Litani, y Siria imputa a los israelíes el estar reacios a retirarse de las costas del Mar de Galilea, la fuente de hasta un 30% del agua israelí. Turquía ha sido acusada por Siria e Irak de

arrebatarles el agua, al continuar construyendo presas a lo largo del Tigris y el Eufrates; el país también está embarcado en un ambicioso proyecto de venta del agua de su río Manavgat a Oriente Medio. Egipto advirtió en 1991 que utilizaría la fuerza para proteger su acceso a las aguas del Nilo, que también es compartido por Etiopía y Sudán. Los enfrentamientos en el Punjab (India), que han provocado más de 15.000 muertos durante la década de los ochenta, son el resultado de disputas por el reparto del agua. En España, los actuales conflictos políticos en torno al Plan Hidrológico Nacional son otro ejemplo de las pugnas por el agua que afecta incluso a las relaciones entre regiones dentro de un mismo país.

La gestión de la escasez de agua parece ignorar dicha escasez cuando plantea nuevos regadíos, o se planifica el territorio con nuevas demandas de agua. La nueva Ley de Aguas incorpora los centros de transferencias de agua, los llamados "bancos públicos de agua", en donde se transfieren usos, una parte de los cuales puede ir a servicios ambientales, esto es al uso de los ecosistemas, a fin de mejorar la calidad de los mismos. La adquisición de derechos de uso se dirige a evitar nutrientes, nitratos, etc., con la consecuente mejora de la calidad del agua. Sin embargo, ante situaciones de emergencia, de sequía, se vuelve a

recurrir a los conflictos, soluciones basadas en la obra hidráulica.

Pero al mismo tiempo, el agua es una fuente de cooperación pues las cuencas fluviales requieren ser administradas conjuntamente, lo cual comporta enormes dificultades pero también genera oportunidades de colaboración. El caso del río Jordán es paradigmático: existe un acuerdo entre Siria y Jordania, otro entre Jordania e Israel, y uno más entre Israel y Palestina —o sea, una serie de acuerdos bilaterales para una cuenca multilateral bastante bien administrada, aunque los palestinos terminen por reivindicar y probablemente por obtener derechos de agua más amplios—. Los afectados por desastres ambientales, como huracanes, tifones, etc., son también receptores de ayudas internacionales que, aunque siempre insuficientes, consiguen aliviar la situación de las víctimas.

La gobernabilidad de los países y del mundo está siendo afectada por el cambio global, aunque en direcciones a veces contradictorias: el aumento de conflictos —tal como ha sido ilustrado anteriormente— y al mismo tiempo el aumento de la cooperación y la gobernabilidad mundial. El Protocolo de Kioto para luchar contra el cambio climático (en fase de acuerdo el denominado post-Kioto),

por ejemplo, es de los pocos acuerdos mundiales existentes (firmado por más de 150 países), aun conllevando importantes compromisos económicos²¹. Por otra parte, una consecuencia del cambio global está siendo la participación de nuevos actores sociales en el proceso de discurso y legitimación, destacando la creciente importancia del movimiento ecologista como agente de cambio social²². La gobernabilidad alude no sólo a la dimensión política (gobernabilidad democrática) sino también a la económica, social (incluida la lucha contra la pobreza y la igualdad de oportunidades de género) y medioambiental. Específicamente la gobernabilidad medioambiental se refiere a todo lo tendente a la creación de los marcos y capacidades institucionales necesarios para asegurar los bienes públicos medioambientales y la equidad en el acceso intra e intergeneracional a los mismos, así como a la prevención y manejo de las crisis y situaciones de conflicto. La gobernabilidad es una de las esferas claves de prevención y adaptación de las sociedades al cambio global, que aún requiere un desarrollo teórico y práctico en el ámbito del análisis de impacto.

7.6. El impacto en el patrimonio histórico-natural. El papel de los espacios protegidos

Los cambios en el uso del suelo producen, además de la degradación de la integridad ecológica de muchos ecosistemas, cambios en la composición atmosférica por su efecto en el ciclo global del carbono y del agua (Foley *et al.*, 2005). Esta degradación afecta también a nuestro patrimonio histórico. Los cambios en composición atmosférica, como la lluvia ácida, causan también importantes daños en edificaciones y, en particular, en el patrimonio histórico, siendo responsable de la aceleración de la erosión de la piedra y conjuntos escultóricos al aire libre. Los gases atmosféricos implicados en el llamado “mal de la piedra” son, principalmente, los óxidos de carbono, los óxidos de nitrógeno y los óxidos de azufre, liberados en la quema de combustibles fósiles. El aumento del nivel del mar también amenaza el patrimonio histórico, como es el caso de algunas ciudades como Venecia.

El cambio global ha alterado los paisajes culturales generados tras procesos milenarios donde han ido evolucionando fuerzas naturales y humanas. Estos paisajes han variado su

21. El Ministerio de Medio Ambiente de España calculó en unos 3.000 millones de euros la factura por incumplir nuestros compromisos en el Protocolo de Kioto.

22. El Consejo Asesor de Medio Ambiente de España está formado, entre otros, por las organizaciones ecologistas, aunque no participa ninguna organización científica.

característica heterogeneidad para configurarse como extensos paisajes homogéneos (cultivos intensivos, asentamientos urbanos, por ejemplo), siendo ésta una de las causas más importantes de la pérdida de la biodiversidad, ya que conlleva la desaparición de los hábitats de muchas especies (Pimm & Raven, 2000).

La base de la política de la conservación de la naturaleza en nuestra sociedad actual se asienta en la configuración como espacios naturales protegidos de los fragmentos más singulares de los ecosistemas naturales en desaparición. Esta tendencia se refleja en los más de 100.000 espacios mundiales protegidos (12% de la superficie terrestre, pero sólo el 0,6% de la marina del planeta, WDPA-Word Database on Protected Areas) y, concretamente en España, en 1.587 espacios protegidos que ocupan 5.952.226 ha de la superficie terrestre (11,8% del territorio) y 251.139 ha de la superficie marina (Europarc-España, 2007)

En general, estos espacios protegidos conservan sus valores naturales gracias a figuras legales que prohíben o restringen determinados usos, contrastando con la dinámica de intensa transformación que se produce en los alrededores de sus límites. El resultado es un modelo territorial de antinomias (protegido *versus* no-protegido), en el que los espacios protegidos aparecen como “islas” en un territorio más o menos

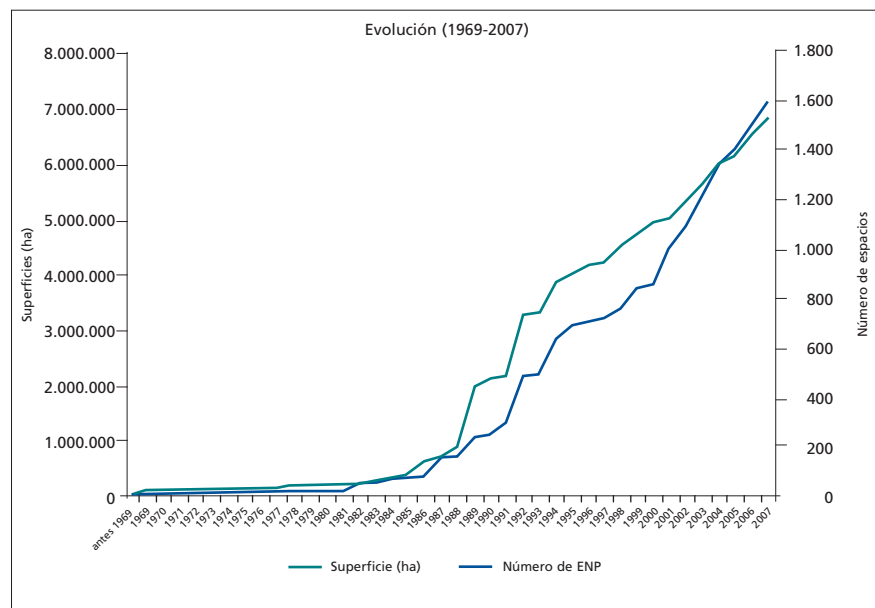
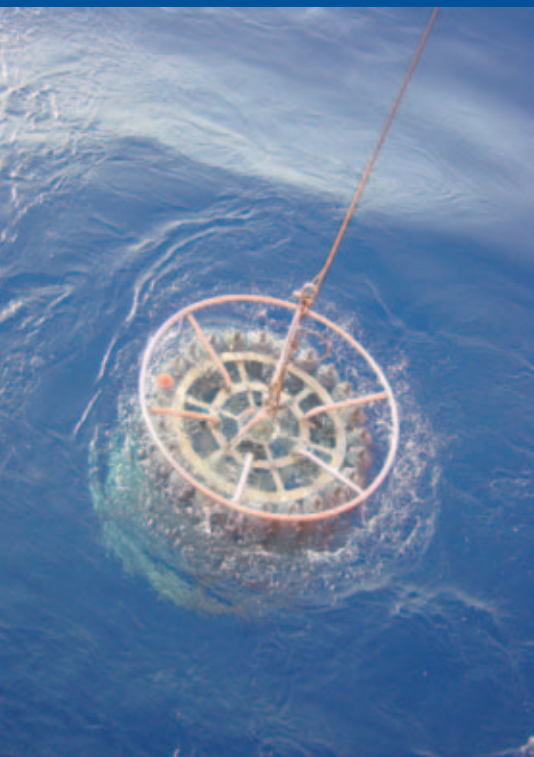


Figura 7.9. Evolución de la declaración de los espacios protegidos en España en los últimos 40 años. Puede observarse cómo el número de espacios protegidos no ha dejado de crecer ya que sigue considerándose la mejor herramienta para la conservación de la biodiversidad pero al ser gestionadas, la mayoría de ellas, como entidades estáticas no consiguen alcanzar sus objetivos. Fuente: Europarc-España, 2009.

transformado; situación que no beneficia los objetivos de conservación. Por un lado, los procesos biogeofísicos trascienden los límites administrativos, una realidad que queda patente al considerar que la expresión “ponerle puertas al campo”, que podría definir la situación descrita, se equipara en el habla popular con un sin sentido. Por otro lado, esta situación genera espacios estáticos tan diferenciados que conlleva en ocasiones conflictos por parte de la población local en relación a la explotación de sus recursos. Por ello, se

avanzó hacia la tendencia actual, donde el modelo de redes ecológicas pretende —a través de corredores biológicos— conectar los fragmentos de ecosistemas protegidos. En este modelo continúan los conflictos entre uso y conservación, y se siguen considerando los espacios protegidos como un fin en sí mismo. Frecuentemente, el objetivo de gestión de estas áreas protegidas es la inmutabilidad o incluso revertir el estado de los ecosistemas sujetos de protección a un estado anterior más virginal. Estos objetivos no consideran suficientemente



Roseta hidrográfica descendiendo en la columna de agua del Atlántico Subtropical.
Fotografía: G. Pearson.

el carácter dinámico de los ecosistemas ni que inevitablemente el cambio global impone también cambios sobre los ecosistemas protegidos (Miller, 2004), que experimentan cambios climáticos, que llevan a cambios en las comunidades, cambios en la composición de gases, que altera la fisiología de las especies, etc.

Consideramos entonces que las áreas protegidas del siglo XXI, en el escenario del cambio global, deben cambiar el paradigma que les dio su razón de ser en

el pasado siglo. El modelo alternativo debe incluir la presencia humana como parte esencial del área protegida, con el fin de mantener su funcionalidad (flujos ecológicos, agua, nutrientes, organismos) y enfatizar la capacidad adaptativa al cambio. Esto implica tender puentes entre la política de conservación del agua y la de ordenación del territorio. Ello conlleva —desde el nuevo paradigma de los territorios dinámicos y adaptativos— que los espacios protegidos pasan de ser un fin en sí mismo a ser una herramienta esencial en la ordenación del territorio. Todos los espacios del territorio son importantes —estén protegidos o no— ya que todos juegan un determinado papel dentro de un modelo de mosaico cambiante (García Mora & Montes, 2003).

El objetivo final supone establecer un territorio dinámico de alta biodiversidad y elevada conectividad, lo que le dotarán de la suficiente capacidad para acoplarse a los cambios territoriales actuales, además de amortiguar y reorganizarse ante los impactos naturales y antrópicos que caracterizan el propio cambio global.

7.7. Perspectivas sociológicas

Los cambios globales están afectando de forma muy relevante a las sociedades en virtualmente todas las esferas de la acción social: la demografía, la economía, las estructuras sociales y culturales... Al prever sus calamitosos efectos, con el fin de minimizarlos y de maximizar los aspectos positivos, se debe poner el énfasis tanto en sus consecuencias sociales y políticas como en las puramente biogeofísicas. A escala global existe un importante retraso en comprender, modelizar y cuantificar la vulnerabilidad de los sistemas humanos al cambio global, así como en evaluar su resiliencia y capacidad de adaptación. Por ejemplo, se conoce poco sobre el nivel de efectividad de la aplicación de experiencias de adaptación a la variabilidad climática y acontecimientos extremos pasados y actuales al campo de la adaptación al cambio climático; nada se sabe sobre cómo esta información podría ser utilizada para mejorar las estimaciones sobre la viabilidad, efectividad, costos

y beneficios de la adaptación a largo plazo. También se conoce poco sobre las diferencias en la capacidad adaptativa de las diferentes regiones del mundo y los diferentes grupos socioeconómicos. Igual ocurre con los roles que el cambio institucional y de modelos de consumo en el futuro jugarán en la capacidad de las sociedades para prepararse y responder al cambio global²³.

Los riesgos y los impactos económicos de estos cambios han sido, de forma reciente, objeto de evaluación por parte de aseguradoras. Las incertidumbres y riesgos asociados al mercado, los riesgos normativos, no son del orden de las del cambio global. El informe de 2008 *World Economic Forum* considera que el cambio climático será uno de los riesgos mayores internacionales con unos costes de pandemias²⁴. También hay grupos de inversores que incorporan a los riesgos emergentes —con turbulencias financieras que provocan los fondos basuras— productos de alto riesgo, concretamente el riesgo del cambio climático. El *Carbon Disclosure Project*²⁵ compromete a los fondos de inversión —suman 41 trillones dólares— a una

evaluación independiente de sus inversiones a largo plazo en riesgos del cambio climático.

Es por ello que la toma de decisiones es una esfera clave de la acción social cuando se trata de incertidumbres —incluyendo los riesgos de cambios irreversibles y/o no lineales—, las cuales puede que se aborden de forma insuficiente en unos casos o por el contrario excesiva en otros, cuyas consecuencias pueden afectar a varias generaciones. Las incertidumbres se producen por diversos factores, incluyendo problemas de datos, modelos, falta de conocimiento de interacciones importantes, representación imprecisa de la incertidumbre, variaciones estadísticas y errores de medida, y juicio subjetivo, entre otros. El creciente uso de los biocarburantes en los últimos años ha mostrado que algunas medidas de adaptación pueden tener efectos negativos: el mundo está sufriendo de una fuerte subida del precio de los alimentos debido, entre otras razones, a que muchos agricultores prefieren cultivar plantas para biocarburantes. ¿Se han convertido los biocarburantes en una amenaza para la estabilidad social



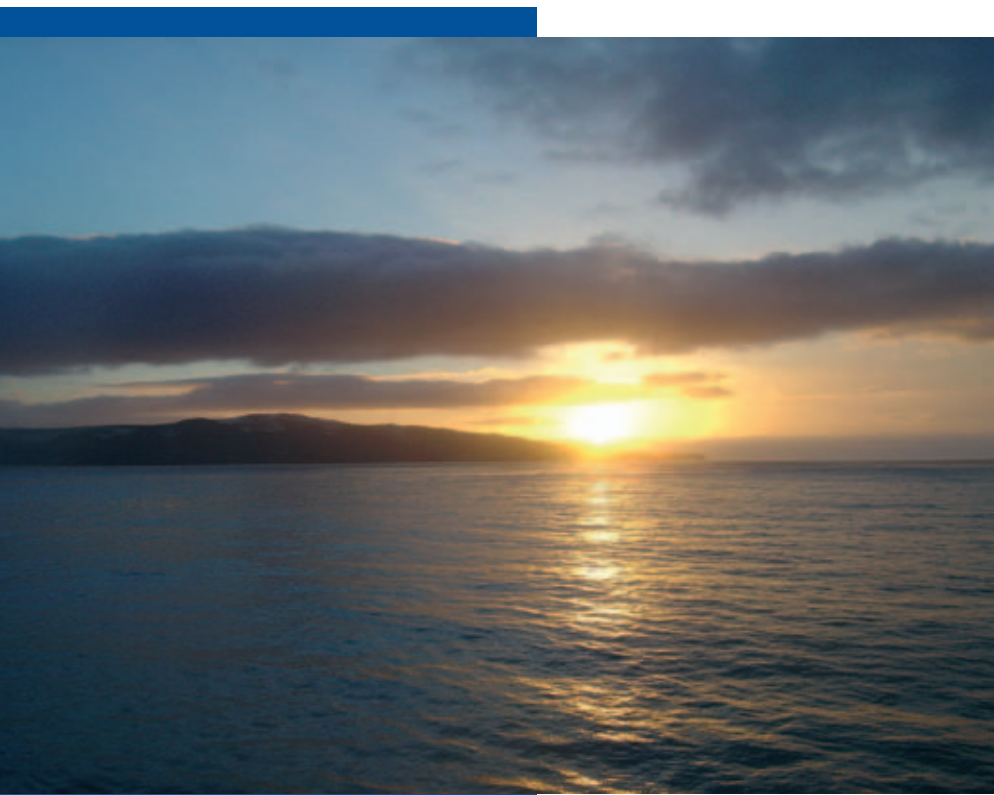
Observatorio astronómico El Roque de los Muchachos, junto a la Caldera de Taburiente en la isla de La Palma.

Fotografía: F. Valladares.

23. Relativo a estos aspectos, existe un amplio margen para mejorar, desde el punto de vista sociológico, los estudios que realizó el Ministerio de Medio Ambiente de España en relación a su Plan de Adaptación al Cambio Climático.

24. "WEForum: Global Risks 2008. A global Risk Network Report". 2008. En <http://www.weforum.org/pdf/globalrisk/report2008.pdf>

25. "Innovestgroup: Carbon Beta and Equitative Performance. An Empirical Analysis". 2007. En: <http://www.cdproject.net/>



Puesta de sol sobre la costa.

en vez de ofrecer soluciones sostenibles para el problema del uso de la energía fósil?

La adaptación al cambio global exige la toma de decisiones. Acciones que deben estar basadas en el principio de proporcionalidad, abordar la mitigación y la adaptación, ambas igualmente importantes e

interrelacionadas. Se precisa pasar de la evaluación a concretar planes y programas de actuación. Es algo que no puede hacer el sector público sin implicar al sector privado, aunque el liderazgo del sector público es clave. La *London Climate Partnership* sería este nuevo tipo de gobernabilidad, en que el sector público junto con consultoras, aseguradoras, universidades y sector privado afrontan medidas para evitar las vulnerabilidades del cambio climático²⁶.

Se requiere avanzar en la investigación del impacto del cambio global en áreas relevantes de las sociedades que apenas o nada se han estudiado. Entre éstas, destacamos los temas de igualdad/desigualdad social, el del desarrollo ético de las sociedades, las relaciones de poder y la justicia social, que han sido minusvalorados en la agenda investigadora del impacto del cambio global, y que son fundamentales para el funcionamiento, adaptación y supervivencia de las sociedades. Pero sobre todo, se requiere avanzar en enfoques integrales e integrados del impacto del cambio global, que permitan avanzar en la comprensión de los factores sociales, no como un listado temático, sino en cómo va a afectar a la capacidad de funcionamiento de la 'fábrica' social, y, la relación entre ésta y la vulnerabilidad

26. "Your home in a changing climate. Retrofitting Existing Homes for Climate Change Impacts". Febrero 2008. En <http://www.london.gov.uk/trccg/docs/pub1.pdf>

del sistema biofísico y su capacidad de adaptación. La atención a los efectos acumulativos y sinérgicos debería ser central, pues implica una perspectiva más compleja y completa de las problemáticas del cambio global, al

incorporar la noción de interconexión de los elementos que conforman el medio ambiente (tanto biofísico como social), así como las relaciones interdependientes que configuran los ecosistemas. Este enfoque ayuda a la

creación de verdaderas soluciones a problemas concretos del cambio global, evitando el desplazamiento de la contaminación y otros problemas de un medio a otro, como a menudo ocurre.

Cuadro 7.1.

Delta del Ebro

Los cambios ambientales inducidos por actividades humanas no solamente han sucedido durante el último siglo. Un ejemplo paradigmático que esto no ha sido así lo aporta el estudio de la dinámica de sedimentos del delta del Ebro que indica que éste se formó a partir del siglo XVI debido a un incremento de los aportes de material particulado por el río (Maldonado 1972). Este incremento de sedimentos fue debido a cambios importantes en la utilización del territorio en toda la cuenca del Ebro, que conllevaron una disminución de la masa forestal de ésta, y, por lo tanto, aumentaron la erosión. Por ejemplo, anteriormente la región de los Monegros en Aragón estaba ocupada por grandes extensiones de bosques. La tala de árboles para su uso en la construcción de buques, etc., y el incremento de las zonas agrícolas conllevo una mayor erosión, y por lo tanto, un incremento del material particulado que llegaba al mar, que en un periodo de tres siglos permitió la formación del delta del Ebro, tal como lo conocemos actualmente (ver figura 7.10.). El carácter dinámico de estas

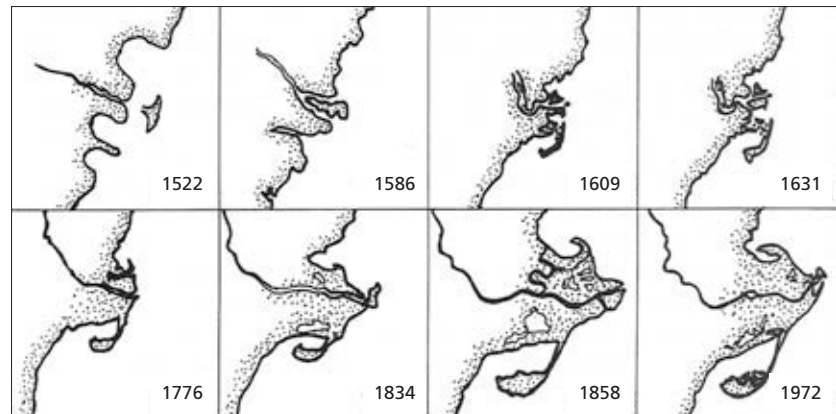


Fig. 7.10. Evolución del delta del Ebro desde el siglo XVI al siglo XX.

Fuente: adaptado de Maldonado 1972.

formaciones y su alta sensibilidad a las actividades humanas, también se demuestra por la lenta pero constante regresión que el delta del Ebro está sufriendo en los últimos decenios. Este segundo cambio importante en la dinámica del delta del Ebro se debe a la

construcción de numerosos embalses a lo largo del río Ebro que impiden que éste aporte en la actualidad una cantidad suficiente de sedimentos. Así, el delta del Ebro y su historia es un ejemplo del impacto de las actividades antropogénicas en los ecosistemas a escala regional.

Referencias

- ARROJO, P. y MARTÍNEZ, F. J. (1999). *El agua a debate desde la Universidad. Hacia una nueva cultura del agua*. Institución Fernando el Católico (CSIC). Excma. Diputación de Zaragoza. Zaragoza.
- COOK, M. A. (2003). *Brief history of the human race*. Norton, New York.
- DIAMOND, J. (2004). *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*. Viking Adult.
- DIETZ, THOMAS y EUGENE A. ROSA (2001). "Human Dimensions of Global Environmental Change". En Riley E. Dunlap and William Michelson (eds.), *Handbook of Environmental Sociology*. Greenwood Press. Westport, CT. Pp. 370-406.
- EUROPARC-ESPAÑA (2007). *Anuario 2007. Anuario del estado de los espacios naturales protegidos*. Fundación Fernando González Bernáldez. Fundación BBVA.
- FAGAN, B. (2004). *The Long Summer: How climate changed civilization*. Basic Books.
- FOLEY, J. A. ET AL. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309: 570-574.
- GARCÍA MORA, R. & MONTES, C. (2003). *Vínculos en el paisaje mediterráneo. El papel de los espacios protegidos en el contexto territorial*. Consejería de Medio Ambiente.
- GARCÍA MORA, R. y MONTES, C. (2003). *Vínculos en el paisaje mediterráneo. El papel de los espacios protegidos en el contexto territorial*. Sevilla: Consejería de Medio Ambiente de Andalucía.
- IPCC (2007). Fourth Assessment Report – Working Group II Report: Impacts, Adaptation and Vulnerability. New York: Naciones Unidas.
- JORDAN, A. Y LENSCHOW, A. (2008). *Innovation in Environmental Policy? Integrating the Environment for Sustainability*. Cheltenham: Edward Elgar.
- KATHIRESAN, K. y RAJENDRAN, N. (2005). "Coastal mangrove forests mitigated tsunami", *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 65: 601-606.
- LEAL FILHO, WALTER (ED.) (2002). *International Experiences on Sustainability*. Peter Lang Publisher, Frankfurt, Berlín, Berna, Bruselas, Nueva York, Oxford.
- LÓPEZ, Iván (2009 en prensa). "El desarrollo sostenible: sostenibilidad débil y fuerte y los Objetivos de Desarrollo del Milenio", en Fundación Carolina, *Cambio climático y lucha contra la pobreza*. Madrid.
- MALDONADO, A. (1972). *Bolet. Extratigr.* 1:1-486. Universitat de Barcelona.
- MILLER, K. (DIR.) (2004). Securing protected areas in the face of global change. *Issues and strategies*. IUCN. WCPA
- PARDO, M. (2002). *La evaluación del impacto ambiental y social para el siglo XXI: Teorías, Procesos, Metodología*. Editorial Fundamentos. Madrid.
- PÉREZ ARRIAGA, J. I.; SÁNCHEZ DE TEMBLEQUE, L. J.; PARDO, M. (2004). "Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible". En: Fundación Encuentro. *Informe España 2004, Una interpretación de su realidad social*. Fundación Encuentro. Madrid.
- PIMM, S. L. & RAVEN, P. (2000). "Extinction by numbers". *Nature* 403: 843-845.
- ROSA, E. (Committee Co-Author) (2005). *Thinking Strategically: The Appropriate Use of Metrics for the Climate Change Science Program*. Report of the Committee on Metrics for Global Change Research. National Research Council/National Academy of Sciences. Washington, D.C.
- STERN TEAM (2006). *Stern Review on the economics of climate change*. Cambridge University Press.
- TIBBETTS, J. (2006). Louisiana's Wetlands: "A Lesson in Nature Appreciation". *Environ Health Perspect* 114: 40-43.

8. Impacto económico del cambio climático

8.1. Introducción

Es importante plantearse cómo puede afectar el cambio climático a nuestras economías en su conjunto y a sectores concretos como, por ejemplo, la agricultura, el turismo y los sistemas costeros. Comprender mejor las consecuencias económicas del cambio climático es crucial para la justificación y el diseño de las dos clases de políticas que se pueden adoptar en la lucha frente al cambio climático: la de mitigación o reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (hacer frente a las causas del problema) y la de adaptación (hacer frente a las consecuencias del cambio climático). La política de mitigación determina cuánto, cuándo, y cómo reducir las emisiones, y quién asume el coste de las reducciones. Estas políticas sobre todo

afectan al sector energético (véase el capítulo 9 sobre energía), el principal responsable de las emisiones de GEI. Reducir emisiones conlleva unos costes económicos, que están justificados por la reducción del daño medioambiental y económico del cambio climático. La política de adaptación persigue minimizar los daños que provoca el cambio climático y, asimismo, aprovechar las oportunidades o beneficios que puede ofrecer.

El análisis del impacto económico del cambio climático requiere estudiar cómo las distintas manifestaciones del cambio climático afectan a todos los mercados relevantes, y, en concreto, a los precios. Vivimos en economías de mercado en las que los precios juegan un papel fundamental. Por ejemplo, cuando el precio de un producto baja su demanda aumenta. En general los



Experimento de largo plazo para determinar la respuesta del ecosistema a los cambios en concentración de CO₂, temperatura y precipitación previstos por los modelos de cambios climático en Dinamarca.

Fotografía: C. M. Duarte.

consumidores deciden en qué se gastan su dinero según los precios de los bienes y servicios que compran, así como según los salarios y otras rentas que perciben, que son también precios. De la misma forma, las empresas deciden cuánto producir en parte según el precio que reciben de la venta de sus productos. A mayor precio más estarán dispuestas a producir para lograr unos mayores ingresos y, por tanto, beneficios. Los precios en definitiva

afectan al comportamiento de los consumidores y productores.

8.2. ¿Cuál es el impacto económico de un kilo de CO₂ más en la atmósfera?

Una pregunta aparentemente sencilla

Cada español emite una media de ocho toneladas de CO₂ al año a la atmósfera terrestre, el GEI más importante. Esto significa que cada uno de nosotros emitimos unos veintidós kilos de CO₂ al día. Por ejemplo, recorrer seis kilómetros en un coche de tamaño medio supone emitir un kilo de CO₂, aproximadamente, que ocupa un volumen de unos 500 litros, o sea, medio metro cúbico. ¿Qué efecto o daño económico provoca ese kilo adicional sobre la atmósfera? ¿Cuánto deberían pagar los viajeros del coche para compensar el daño que provoca ese CO₂ adicional?

Conocer la respuesta permitiría compensar a los que sufren las consecuencias negativas del cambio climático. Se podrían penalizar las actividades económicas que emiten CO₂ y GEI, de forma más general. Por ejemplo, se podría fijar un impuesto por cada kilo de CO₂ que se emita, estableciéndose una compensación o transferencia a los que sufren los daños del cambio climático.

Asimismo, determinar el impacto económico de un kilo de CO₂

permitiría comparar lo que cuesta reducir las emisiones de CO₂ con el beneficio que se obtiene por la menor contaminación, en términos de menor daño económico. Es el típico ejercicio coste-beneficio que realizan los economistas: comparar los costes con los beneficios. La idea es que si los beneficios son mayores a los costes, tiene sentido económico llevar a cabo la acción, en este caso, emitir menos CO₂.

Sin embargo, responder a esta pregunta aparentemente sencilla es enormemente complicado. Es la típica pregunta fácil de formular pero cuya respuesta conlleva asumir numerosas hipótesis y hacer frente a la gran complejidad del problema del cambio climático.

Del CO₂ al euro: el viaje del CO₂ desde el motor de un coche hasta sus efectos económicos

¿Cómo se podría medir el impacto que provoca el CO₂ en la economía? Sería necesario contar con el conocimiento y la participación de expertos de distintas disciplinas científicas, además de economistas. En primer lugar, harían falta climatólogos o expertos en el funcionamiento del clima. Estos expertos estudiarían cómo las emisiones de CO₂ afectan al clima, entendido de una forma amplia: cambios en las temperaturas medias, en las temperaturas extremas (por ejemplo



olas de calor), cambios en la precipitación media, fenómenos meteorológicos extremos (como sequías) y de tipo catastrófico.

En segundo lugar, harían falta expertos de cada una de las áreas o sectores económicos afectados por el clima. Aquí el conjunto es amplio: expertos en salud humana, ingenieros civiles, ingenieros agrónomos y un largo etcétera. Estos expertos explicarían cómo por ejemplo las cosechas agrícolas se ven afectadas por el clima. En determinadas áreas geográficas las cosechas se verían reducidas, mientras que en otras podría haber más producción.

Sapillo mimético en la hojarasca de un bosque húmedo valdiviano (Chile).

Fotografía: F. Valladares.

En tercer y último lugar, los economistas pondrían un precio a todos y cada uno de los efectos del cambio climático: cambios en las cosechas agrícolas, más inundaciones de cuencas de ríos, mayor erosión en las costas, más uso de aparatos de aire acondicionado en verano, mayor frecuencia e intensidad de sequías y olas de calor, etcétera. Los economistas son afortunados de alguna forma porque el entorno económico proporciona la enorme información contenida en los precios de mercado: desde lo que cuesta un kilo de trigo hasta por ejemplo el coste de un seguro de vida. Sin embargo, dada la complejidad del problema del cambio climático, esto no es suficiente y un gran conjunto de efectos del cambio climático no tiene valoración o precio de mercado. Ejemplos destacables son la pérdida de biodiversidad o el deterioro de ecosistemas naturales.

8.3. Nuestro conocimiento sobre los efectos económicos del cambio climático

Lo que no sabemos

A pesar de que se han hecho muchos esfuerzos por entender mejor las consecuencias económicas del cambio climático, todavía queda mucho por saber. Posiblemente los sectores

económicos más vulnerables son los que más se pueden ver afectados por el aumento de la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos. Sin embargo, comprendemos mucho mejor los efectos de cambios en la media de las variables climáticas que las consecuencias de cambios en la variabilidad. Podemos decir mucho más sobre las tendencias generales del clima que sobre fenómenos meteorológicos o efectos concretos sujetos a un alto grado de incertidumbre y a la influencia de innumerables factores. Si pensamos por ejemplo en olas de calor, la salud humana será posiblemente una de las áreas más afectadas, al incidir en la morbilidad y mortalidad de los habitantes de las ciudades. La agricultura también puede sufrir las consecuencias de prolongados periodos de sequía, lluvias torrenciales u olas de frío. Las inundaciones en las cuencas de ciertos ríos causarían impactos notables sobre muchas otras actividades económicas, provocando, por ejemplo, pérdidas en el comercio minorista, además de en viviendas y otras infraestructuras.

Lo que sabemos: daño total

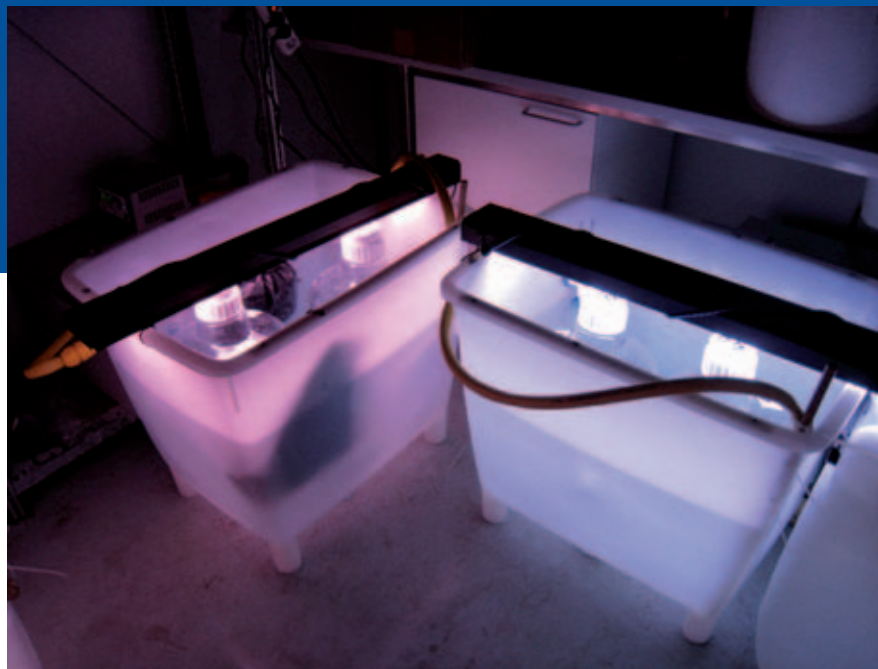
Realmente sabemos poco sobre los efectos económicos del cambio climático en sectores y zonas geográficas concretas. Hay pocas estimaciones y están sujetas a muchas incertidumbres. Las estimaciones de

daño total o agregado para el mundo son clave para justificar las políticas de reducción de emisiones. Un caso muy ilustrativo en este sentido fue la forma de resolver el problema del agujero en la capa de ozono. La Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) de los Estados Unidos realizó un estudio sobre los posibles costes para la sociedad derivados de una expansión del agujero en la capa de ozono. Se concluyó que éstos podían ser muy elevados, sobre todo debido a la mayor mortalidad por cáncer de piel. Ello motivó de alguna forma a los políticos a lograr un acuerdo internacional, el Protocolo de Montreal, por el que se eliminaron gradualmente las sustancias químicas que alteran la cantidad de ozono presente de manera natural en la atmósfera.

Los primeros estudios sobre el impacto del cambio climático concluían que el daño total sobre la economía mundial a final del siglo XXI podría estimarse en un uno por cien del PIB mundial. Los países desarrollados sufrirían un impacto menor, mientras que los países en vías de desarrollo, generalmente más vulnerables a los efectos del cambio climático (debido a diversos factores como la gran concentración de población en zonas costeras, la escasez de alimentos y agua y, en general, menores infraestructuras y recursos para hacer frente al cambio climático), podrían tener un daño del 1,5 al 3,5% de su PIB. Estudios

Experimentos para evaluar la respuesta del pláncton del Ártico al aumento de temperatura.

Fotografía: C. M. Duarte.



posteriores han llegado a resultados muy dispares. Hay autores que concluyen que el cambio climático puede conllevar más efectos beneficiosos que perjudiciales, con efectos positivos como el mayor aprovechamiento agrícola de territorios en latitudes altas o el retroceso de zonas desérticas en las cercanías del ecuador.

Más recientemente, el informe Stern sobre el cambio climático (Stern, 2007) obtuvo unos resultados muy distintos: el cambio climático podría provocar un daño anual al sistema económico mundial de entre el 5% y el 20% del consumo de cada persona del planeta. Esta cifra es extraordinaria si se compara con el crecimiento económico de la economía mundial. La media de los últimos cuarenta años ha sido el 3,6%. O sea, que si tomamos el valor mínimo del informe Stern, tendríamos un daño del 5%, superior al crecimiento a largo plazo de la economía mundial.

¿Por qué esas diferencias? Sobre todo por lo que se mide y no se mide en cada estudio. El informe Stern intentó

considerar todos los posibles efectos del cambio climático: los que tienen un precio de mercado y los que no, como los efectos sobre los ecosistemas y la biodiversidad y los efectos sobre la salud. Las variaciones en los patrones climáticos y meteorológicos afectan a la incidencia de enfermedades en distintas zonas geográficas (por ejemplo, desplazamiento de enfermedades tropicales hacia el norte, desplazamiento de enfermedades transmitidas por insectos, animales, y plantas que se desplazan en respuesta a los cambios climáticos, etc.). El cambio climático también puede afectar a la

incidencia de enfermedades en animales y plantas (con consecuencias económicas, positivas y negativas, sobre cosechas y cabaña).

Asimismo el informe Stern considera las consecuencias de fenómenos de tipo catastrófico, como que se detenga la corriente del Golfo (la corriente termohalina) que mantiene la temperatura media invernal de Europa occidental a niveles más moderados que los de otras zonas del mundo situadas en las mismas latitudes y sometidas por regla general a inviernos mucho más severos (como en la franja oriental de

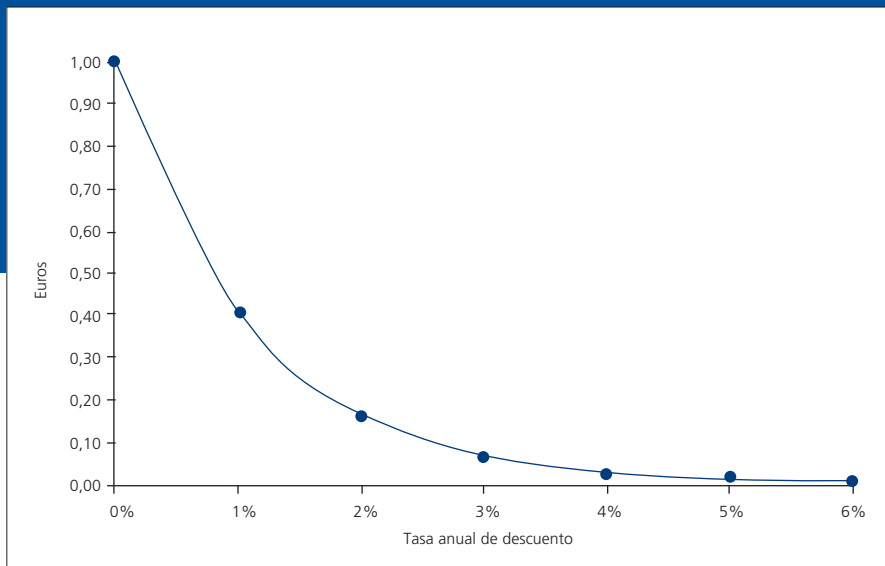


Figura 8.1. Valoración hoy de un euro de daño en el 2100 según distintas tasas de descuento.

los Estados Unidos). La detención de la corriente termohalina a consecuencia del calentamiento global produciría, paradójicamente, un enfriamiento “local” significativo de toda Europa occidental.

Asimismo, dos supuestos aparentemente técnicos explican gran parte de las diferencias. Una hipótesis fundamental de cualquier cálculo es cómo se valora en euros del presente el daño que se producirá en el futuro, por ejemplo, al final de este siglo. Los economistas usan lo que se llama tasa de descuento para convertir los euros del futuro en euros de hoy. En efecto, los euros del año 2100 no valen lo mismo hoy. Es necesario adoptar algún tipo de suposición sobre lo que vale el

bienestar de la sociedad dentro de cuatro generaciones.

Esta discusión sobre cómo valorar el euro de daño en el año 2100 es muy complicada y sujeta a opiniones legítimas pero diversas y, en definitiva, juicios de valor. Habrá quien defienda que un euro de daño en el año 2100 debería ser un euro hoy, porque no podemos valorar menos el bienestar de nuestros hijos, nietos y demás descendientes dentro de varias generaciones. Habrá quien diga que dado que existe un tipo de interés en la economía para periodos de muy largo plazo, y que este tipo de interés es el resultado de la acción de muchas personas en los mercados, se debería usar ese tipo de interés, actualmente en

el entorno del 4% anual. En definitiva, este tipo de interés se justifica porque hay gente, los que ahorran, que están dispuestos a no gastar hoy, para tener más rentas en el futuro, que procederán de la inversión que se hace con esos recursos económicos. Los que argumentan que hay que valorar menos ese euro en dinero de hoy, además afirman que nuestros descendientes serán mucho más ricos y que, por tanto, el daño será menos importante, al compararse con una renta o riqueza mucho mayor que hoy en día.

Veamos cómo cambian los resultados según la tasa de descuento que se emplee (véase la figura 8.1). Si por ejemplo se usa una tasa de descuento, siempre anual, del uno por ciento, tendremos que el euro del año 2100 vale cuarenta céntimos hoy. Si usamos un tres por ciento, el euro se convierte en siete céntimos. Y si utilizamos un 5%, ese euro se traduce en cien veces menos hoy, es decir, un céntimo.

La segunda hipótesis afecta a la valoración de los efectos económicos en distintos países. Mientras que hay

autores que argumentan que un mismo euro se debería valorar de la misma forma en todos los países, otros defienden que se debería hacer de forma diferente, de acuerdo con el grado de desarrollo del país, por ejemplo ponderado por la renta per cápita. Dado que se estima que la mayor parte del daño se producirá en los países menos desarrollados, la forma en la que se ponderen estos daños afecta de forma sustancial al daño total estimado en el mundo.

El daño producido por un kilo de CO₂

Hay expertos que han intentado responder a la pregunta que abre este capítulo, es decir, cuánto daño económico provoca un kilo de CO₂. La media de las estimaciones es unos dos céntimos de euro por kilo de CO₂. Pero el rango de las estimaciones es muy amplio. Así la mayor parte de las estimaciones están entre un daño de diez céntimos de euro por kilo de CO₂ y seis céntimos de beneficio gracias al cambio climático.

El problema de las medidas totales o agregadas del efecto económico del cambio climático

Las cuantificaciones vistas esconden grandes variaciones por sectores económicos, países o regiones. En otras palabras, detrás de la cifra total de daño se esconde una distribución muy desigual o

heterogénea de los efectos del cambio climático según los países, regiones, sectores y momentos del tiempo.

Para entender el problema del cambio climático y ver cómo podemos hacerle frente, es necesario tener información detallada sobre las consecuencias en zonas y sectores económicos concretos. Además esta información es clave para poder diseñar políticas de adaptación al cambio climático, tal y como destaca el reciente *Libro Blanco sobre Adaptación al Cambio Climático*, de la Comisión Europea (Comisión Europea, 2009). Veamos a continuación los resultados de algunos estudios referidos a España y Europa, texto algo más técnico.

Efectos económicos del cambio climático en España

El Ministerio de Medio Ambiente financió un extenso estudio que realiza una evaluación preliminar de los posibles impactos del cambio climático en España. El denominado proyecto ECCE (Ministerio de Medio Ambiente, 2005) apunta que a lo largo de este siglo el clima en España cambiará de forma sustancial. El estudio analiza dos escenarios de emisiones de GEI que conllevan un incremento muy importante de la concentración de GEI en la atmósfera respecto a los niveles presentes. En general, las temperaturas podrían ser más cálidas en toda la



Comunidad de algas en la costa de Groenlandia.

Fotografía: Peter B. Christensen.

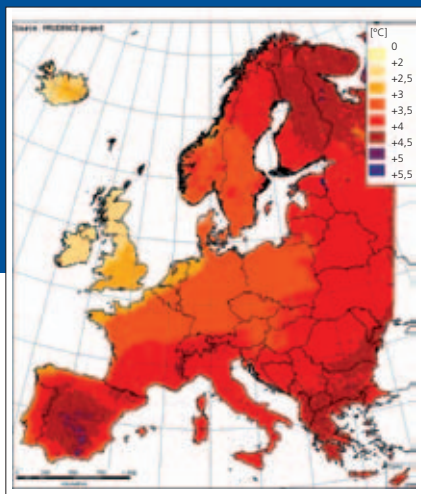


Figura 8.2. Cambio de la temperatura, °C (2071-2100 respecto a 1961-1990).

Fuente: proyecto PESETA

(<http://peseta.jrc.ec.europa.eu/results.html>)

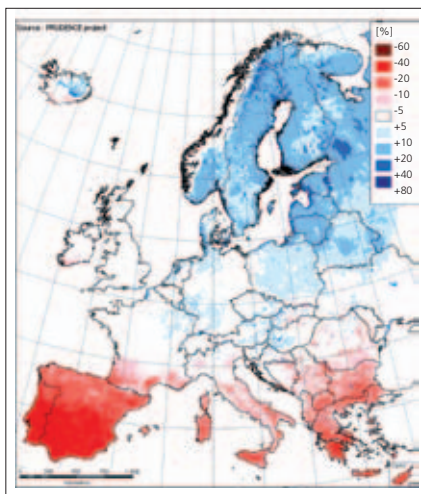


Figura 8.3. Cambio porcentual en precipitación (2071-2100 respecto a 1961-1990).

Fuente: proyecto PESETA

(<http://peseta.jrc.ec.europa.eu/results.html>)

península, sobre todo en los meses de verano, y se esperan menores precipitaciones acumuladas anuales. Las variaciones en temperatura serían más heterogéneas que las de precipitación. Asimismo, las proyecciones climáticas apuntan a una mayor frecuencia de días con temperaturas extremas, especialmente en verano.

El proyecto ECCE evalúa los posibles impactos físicos y económicos de los escenarios climáticos de futuro. Se consideran los siguientes efectos: sobre los ecosistemas, la biodiversidad, recursos hídricos y edáficos, las zonas costeras, los riesgos naturales de origen climático (crecidas fluviales, inestabilidad de laderas, incendios forestales), los impactos en el sector forestal, agrario, energético, turístico y del seguro, así como las consecuencias sobre la salud humana. El estudio concluye que los impactos son negativos en casi todas las categorías, siendo en algunos casos altamente negativos. Así, por ejemplo, se espera que los recursos hídricos en España registren disminuciones importantes. Respecto a la biodiversidad vegetal se estima que se

producirá una penetración de especies mediterráneas en el norte peninsular y el aridamiento del sur.

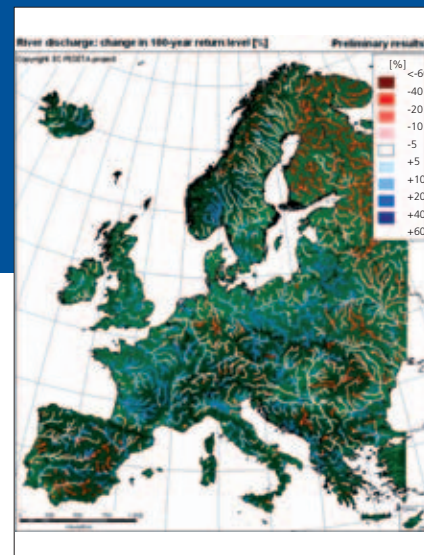
Efectos económicos del cambio climático en Europa

Hay diversos estudios que resumen lo que se conoce sobre los impactos físicos y económicos del cambio climático en el continente europeo (véase, por ejemplo, IPCC, 2007 y AEMA, 2008). Como ilustración de estudio de impacto en Europa a continuación se presentan los resultados preliminares del proyecto PESETA (Ciscar, 2007), publicados en el *Libro Verde sobre Adaptación al Cambio Climático* (Comisión Europea, 2007). El escenario climático considerado conduce a una concentración elevada de GEI en la atmósfera, muy superior a la concentración actual, por tanto se producirían muchas alteraciones en el clima. Este escenario asume que no se adopta ningún tipo de políticas para combatir el cambio climático, ni de mitigación ni de adaptación. Todas las variables de los mapas que siguen se

Figura 8.4. Cambio en la descarga de ríos (2071-2100 respecto a 1961-1990).

Fuente: proyecto PESETA

(<http://peseta.jrc.ec.europa.eu/results.html>).



corresponden con los cambios esperados en el periodo 2071-2100 con respecto al periodo 1961-1990. En las figuras 8.2 y 8.3 aparecen representados los cambios en temperatura y precipitación, respectivamente. En cuanto a la temperatura, el escenario proyecta un calentamiento generalizado en toda Europa, con un aumento mayor en el sur y este del continente (figura 8.2). La figura 8.3 indica una menor precipitación en el sur de Europa, en el entorno del 10% al 20% para algunas zonas geográficas, y una mayor precipitación en el centro y norte de Europa, sobre todo en los países escandinavos.

Efectos sobre las cuencas hidrográficas

Las inundaciones en cuencas hidrográficas dependen de factores como la intensidad, la cuantía y la duración de la precipitación, así como los usos del territorio de la cuenca. La figura 8.4 representa el cambio en las avenidas en las cuencas de ríos europeas mayores de 1.000 km² para inundaciones con una probabilidad de

ocurrencia de una vez cada 100 años. Las líneas en rojo indican cuencas en las que las inundaciones producidas cada 100 años serían más severas, y las líneas en azul cuencas donde las inundaciones serían menos graves que en el pasado reciente (periodo 1961-1990). Se puede observar que en el escenario climático considerado los flujos fluviales aumentan en muchas zonas de Europa, salvo en el noroeste de Europa, zonas de Alemania y en la parte baja del Danubio. En la Península Ibérica, a pesar de que se espera que el clima se vuelva más seco y caluroso, se proyecta un incremento de flujos fluviales para algunas cuencas.

Aparecen *a priori* zonas ganadoras y perdedoras, respecto al pasado reciente. Se constata así la naturaleza asimétrica de los efectos cambio climático en distintas zonas geográficas.

Efectos económicos sobre la agricultura

En términos generales, los rendimientos agrícolas (medidos en toneladas de cosecha por hectárea) dependen tanto

de las condiciones climáticas (temperatura y precipitación) como de las decisiones de los agricultores (por ejemplo, en cuanto a la selección de cultivos o el tipo y el grado de uso de fertilizantes). Es esperable que por ejemplo menor precipitación en una zona determinada dé lugar a menores cosechas. En todo caso, hay que considerar las posibles medidas de adaptación de los agricultores, tanto con el fin de aprovechar las mejoras en las condiciones climáticas como de aminorar las consecuencias negativas del nuevo clima.

La figura 8.5 representa los cambios proyectados en los rendimientos agrarios en Europa. Se observa que en el sur y oeste de Europa existen amplias

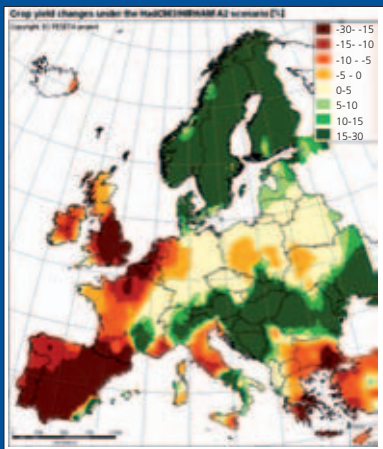


Figura 8.5. Cambio en los rendimientos agrarios (2071-2100 respecto a 1961-1990).

Fuente: proyecto PESETA

(<http://peseta.jrc.ec.europa.eu/results.html>)

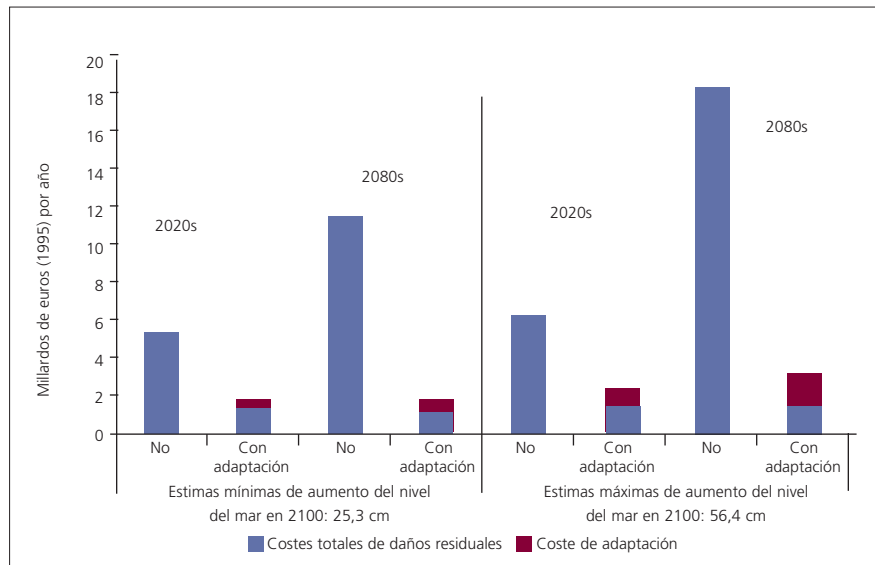


Figura 8.6. Efectos en los sistemas costeros con y sin medidas de adaptación.

Fuente: proyecto PESETA (<http://peseta.jrc.ec.europa.eu/results.html>)

zonas que podrían experimentar disminuciones del rendimiento agrícola, de más del 10%. En el norte de Europa y en la franja del centro de Europa hacia el este (la zona en verde oscuro) se pueden dar mejoras de rendimientos, del orden de más del 15%.

Efectos económicos sobre los sistemas costeros

Las zonas costeras presentan una gran concentración de población e infraestructuras, por lo que el aumento en el nivel del mar puede tener un efecto significativo sobre las costas, con impactos como inundaciones o

aumento de la erosión. La figura 8.6, publicada en el mencionado *Libro Verde sobre Adaptación al Cambio Climático*, representa los costes económicos para el año 2025 y 2085 para dos estimaciones de subida del nivel del mar: baja (25 cm) y alta (56 cm). Los costes o daño del cambio climático se computan tanto sin medidas de adaptación como con respuestas óptimas en términos de política de adaptación (en concreto, construcción de diques y repoblar playas con arena). En este segundo caso, el coste es igual al “coste residual” más los costes de las medidas de adaptación. Se observa que las medidas

de adaptación pueden reducir en gran medida los costes anuales del cambio climático, pasando por ejemplo para década de los 2080 de unos 18.000 millones de euros (sin adaptación) a unos 3.000 millones de euros si se toman medidas de adaptación (escenario de subida del nivel del mar de 56 cm).

Efectos económicos sobre la salud humana

La salud humana está relacionada en general con el clima y, en particular, la temperatura. Así por ejemplo veranos más calurosos pueden verse asociados con una mayor mortalidad. La relación entre mortalidad humana y temperatura se analiza en estudios epidemiológicos, proporcionando evidencia sobre la relación entre temperatura y mortalidad para determinadas áreas geográficas y poblaciones concretas. En principio, el cambio climático podría tanto aumentar la mortalidad relacionada con el calor en verano, como disminuir la mortalidad relacionada con el frío al producirse inviernos más suaves. En todo caso, el efecto final sobre la mortalidad dependerá del grado de aclimatación de la población (cambios a largo plazo tanto fisiológicos como de comportamiento en las personas para ajustarse a un clima cambiante), así como de las posibles medidas de adaptación que se tomen (como, por ejemplo, avisos a la población y actuaciones sanitarias en casos de olas

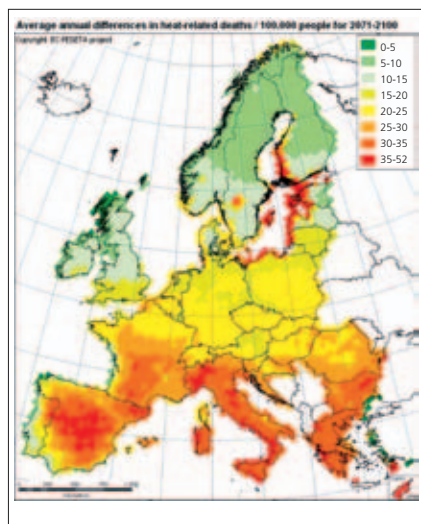


Figura 8.7. Cambio (por 100.000 habitantes) en la mortalidad ligada al calor (2071-2100 respecto a 1961-1990).

Fuente: proyecto PESETA
(<http://peseta.jrc.ec.europa.eu/results.html>)

de calor). Los resultados que siguen no incluyen ni aclimatación ni adaptación al cambio climático.

Las figuras 8.7 y 8.8 representan las proyecciones de mortalidad ligadas al calor y al frío, respectivamente. En cuanto a los cambios relacionados con el calor (figura 8.7) se observa que en el sur de Europa se podrían producir los mayores incrementos de mortalidad (las zonas en rojo), mientras que en el norte de Europa estos aumentos son menores. La mortalidad ligada al frío podría reducirse en toda Europa (se trata por tanto de un beneficio del cambio

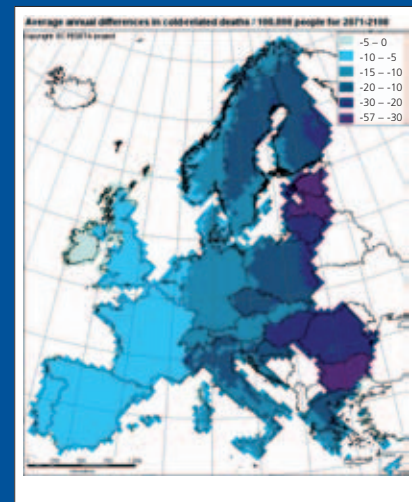
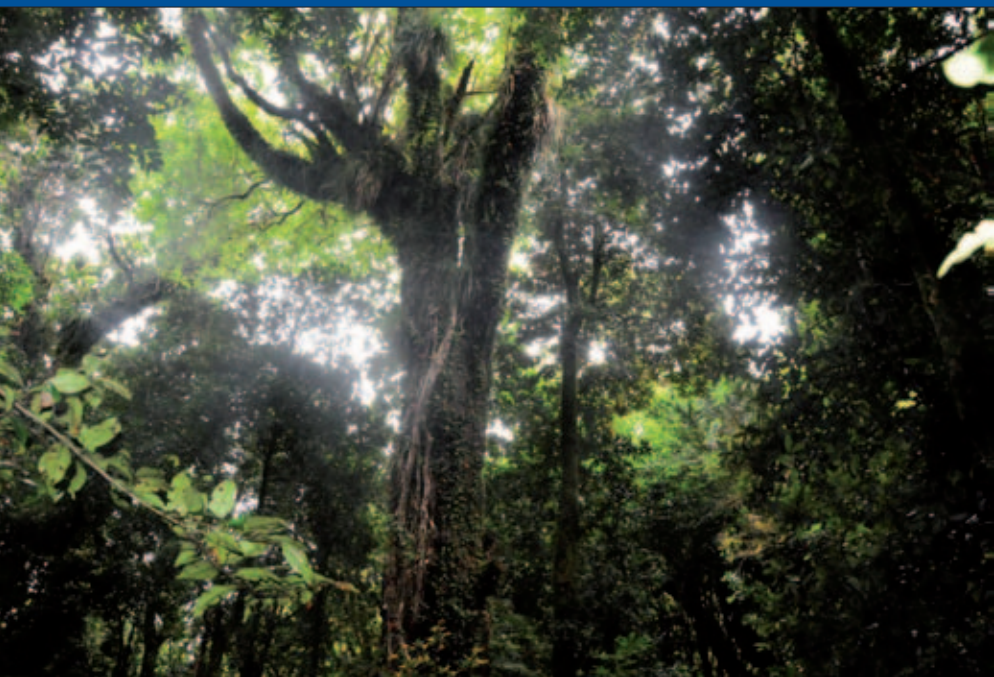


Figura 8.8. Cambio (por 100.000 habitantes) en la mortalidad ligada al frío (2071-2100 respecto a 1961-1990).

Fuente: proyecto PESETA
(<http://peseta.jrc.ec.europa.eu/results.html>)



Biodiversidad amenazada en el bosque templado siempreverde en la isla de Chiloe (Chile).

Fotografía: F. Valladares.

climático), gracias a inviernos más suaves (figura 8.8). Las mayores disminuciones en mortalidad se proyectan en el centro y este de Europa, mientras que las zonas más al oeste hay mejoras menores de mortalidad.

8.4. Algunas reflexiones

Como ha ilustrado el estudio de impactos para Europa, los efectos económicos del cambio climático pueden ser muy heterogéneos según los sectores y regiones considerados. En general, la literatura concluye que

se puede producir una pérdida neta, a pesar de que ciertos sectores económicos y zonas geográficas se podrían beneficiar del cambio climático. Además, la evidencia disponible apunta a que cuanto mayor sea la magnitud del cambio climático, mayores son los daños totales. Esta relación podría ser de tipo proporcional o no. En este sentido, las denominadas no linealidades o comportamientos de tipo caótico conducirían a alteraciones bruscas del clima, con enormes consecuencias sobre la actividad económica y los sistemas naturales.

El problema del cambio climático es en definitiva un problema generado por los mismos ciudadanos que demandan y consumen productos y servicios que alteran la composición química de la atmósfera terrestre: el transporte, el uso de calefacción o de aire acondicionado, y un largo etcétera.

Los ciudadanos pueden tomar muchas y diversas medidas para emitir menos gases de efecto invernadero (IDAE, 2009). Ejemplos son instalar

bombillas de bajo consumo en los hogares, conducir el coche de forma más eficiente (evitar acelerones bruscos, apagar el motor en paradas largas), usar más frecuentemente el transporte público, o ir de vacaciones a lugares más próximos. El papel de las administraciones públicas es también

clave a la hora de modificar los patrones de consumo y de producción, a través de medidas de información, educación y de tipo fiscal. Por ejemplo, premiando mediante subvenciones la implantación de tecnologías de energías renovables y el uso de biocombustibles en los automóviles, o disuadiendo con

impuestos las actividades o consumos más contaminantes, como los desplazamientos en avión. Asimismo, las políticas de fomento del ahorro y eficiencia energética son cruciales, dada su gran contribución potencial a la reducción de emisiones a bajo o, incluso, nulo coste.

Referencias

- AEMA (2008). Impacts of Europe's changing climate - 2008 indicator-based assessment. Joint EEA-JRC-WHO report, EEA Report No 4/2008, JRC Reference Report No JRC47756, European Environment Agency report, 2008.
- CISCAR, J. C. (2007). "Efectos físicos y económicos del cambio climático en Europa: metodologías y algunos resultados preliminares", *Ekonomi Gerizan XV*.
- COMISIÓN EUROPEA (2007). *Libro Verde sobre Adaptación al Cambio Climático en Europa: opciones de actuación para la UE*, COM(2007) 354 final. Disponible en http://ec.europa.eu/environment/climat/adaptation/index_en.htm
- COMISIÓN EUROPEA (2009). *Libro Blanco sobre Adaptación al Cambio Climático: hacia un marco europeo de actuación* COM(2009) 147 final. Disponible en http://ec.europa.eu/environment/climat/adaptation/index_en.htm
- IDAE (2009). *Guía práctica de la energía: consumo eficiente y responsable*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Disponible en <http://www.idae.es/index.php/mod.pags/mem.detalle/recategoria.1142/id.94/reلمenu.64>
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, et al., Eds. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2007), cap. 12.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (2005). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático: proyecto ECCE*. Disponible en http://www.mma.es/secciones/cambio_climatico/areas_tematicas/impactos_cc/eval_pre_imp_esp_cc.htm
- STERN, N. (2007). *The Stern Review of the Economics of Climate Change* (Cambridge Univ. Press).



Campo de nieve en las islas Svalvard, Ártico.

Fotografía: C. M. Duarte.

9. Energía y CO₂

9.1. Nuestra relación de dependencia con la energía

Los humanos que tenemos la suerte de vivir en un país desarrollado, somos adictos a la energía. Obtenemos bienestar y placer cuando consumimos energía. Viajes a lugares alucinantes, luces en la oscuridad, calor cuando hace frío, frío cuando hace calor... los síntomas son conocidos. Por desgracia, todavía no notamos los efectos secundarios del consumo compulsivo de energía. Para empezar, no percibimos nuestro problema de adicción porque no creemos hacer nada extraordinario, ya que todos nuestros vecinos son también adictos. No nos sentimos responsables individuales del problema que causamos, ya que los efectos globales son debidos a la adicción de miles de millones de personas como

nosotros. Además, y quizá esto sea lo más preocupante, todo indica que los efectos negativos de nuestra adicción a la energía los van a sufrir principalmente otras personas, en países lejanos, pobres y más vulnerables al cambio global que estamos causando nosotros. Por último, una gran parte de la gente que hoy parece ser consciente del problema, no acepta las terapias disponibles, porque éstas también tienen sus efectos secundarios (aunque sean mucho menores). Como otros casos de adicción, el problema tiene solución, pero es fácil intuir que nos va a costar mucho desengancharnos de la energía tal y como la conocemos hoy (abundante, siempre disponible y muy barata). Para complicar más las cosas, la mayor parte de la población no adicta que vive en países en vías de desarrollo desea fervientemente ser adicta como nosotros.

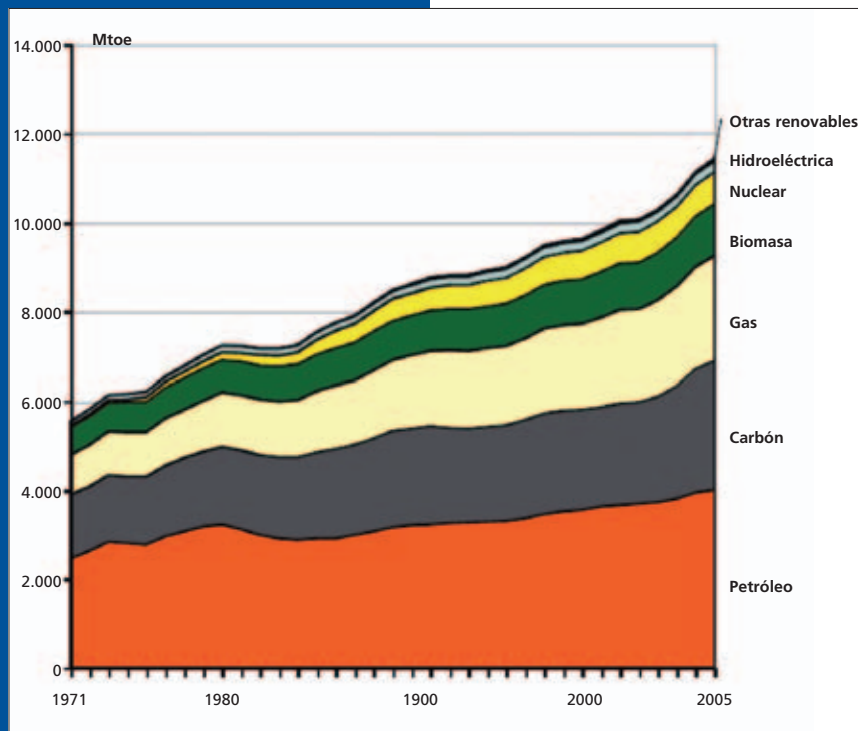


Figura 9.1. Demanda de energía primaria en el mundo en los últimos 35 años.
Fuente: Internacional Energy Agency, 2007.

9.2. 27.000 millones de toneladas de CO₂ al año

El párrafo anterior tiene muchas imprecisiones y requeriría muchos matices. Para empezar, no es cierto que la energía se consuma por nadie ni por nada. La energía en el Universo permanece constante desde su origen en el *big-bang*. La energía sólo cambia de forma. Fluye continuamente de una forma a otra y hemos aprendido a hacerla fluir en nuestro beneficio,

especialmente la que se obtiene de procesos de combustión. Desde el descubrimiento del fuego, la combustión de un material carbonoso accesible ha sido una de las formas más fáciles y atractivas de dotarnos de luz y calor. Tras agotar las fuentes más inmediatas de madera (la deforestación en Europa tuvo lugar hace muchos siglos) nos lanzamos hace unos 200 años a consumir combustibles fósiles (carbón primero y luego petróleo y gas natural). Cuando quemamos combustibles fósiles, estamos liberando una energía almacenada durante millones de años, y liberamos a la vez en forma de CO₂ todo el carbono que los seres vivos capturaron tediosamente mediante la fotosíntesis. El 81% de la energía primaria que “utilizamos” para dotarnos de bienes y productos energéticos proviene de reacciones de combustión de combustibles fósiles.

Los números que acompañan a los flujos de energía y CO₂ son enormes. El suministro de energía primaria en el mundo fue de 474 EJ en el 2005 (IPCC, 2007) (11.400 millones de toneladas equivalentes de petróleo al año). Casi la mitad se consumió en países ricos de la OCDE. Sin incorporar costes ambientales a la ecuación de costes, lo más fácil y barato en cualquier parte del mundo es obtener esta energía de la combustión de los combustibles fósiles, y por ello se emiten a la atmósfera en todo el mundo

más de 27.000 millones de toneladas de CO₂ al año (IPCC, 2007).

A pesar del creciente consenso sobre la necesidad de reducir dichas emisiones, las emisiones de CO₂ siguen creciendo en los últimos años (ver figura 9.1) y es muy probable que sigan creciendo si no se acometen políticas drásticas de reducción. La tendencia al alza de las emisiones de CO₂ y la enorme resistencia a reducir las se debe a que los factores que determinan dichas emisiones son todas muy difíciles de modificar. Dichos factores se suelen expresar con la ecuación de Kaya:

$$\text{Emisiones de CO}_2 = \text{Población} \left(\frac{\text{PIB}}{\text{Población}} \right) \left(\frac{\text{Energía}}{\text{PIB}} \right) \left(\frac{\text{Emisiones de CO}_2}{\text{Energía}} \right)$$

La población del mundo es muy grande y tiende a aumentar hacia 9.000-10.000 millones de personas hacia el 2050. La inmensa mayoría de los humanos desean altos grados de bienestar material, por lo que la renta per cápita (PIB/población) tiende a crecer en casi todo el mundo. La cantidad de energía necesaria para generar una unidad de riqueza (intensidad energética o energía/PIB) es alta en los países en vías de desarrollo y sólo disminuye hacia un cierto valor constante a través de ahorro y eficiencia cuando los países alcanzan altos grados de desarrollo. Por último, el factor de emisión de CO₂ por unidad de energía es casi una constante química que corresponde al mix de combustibles

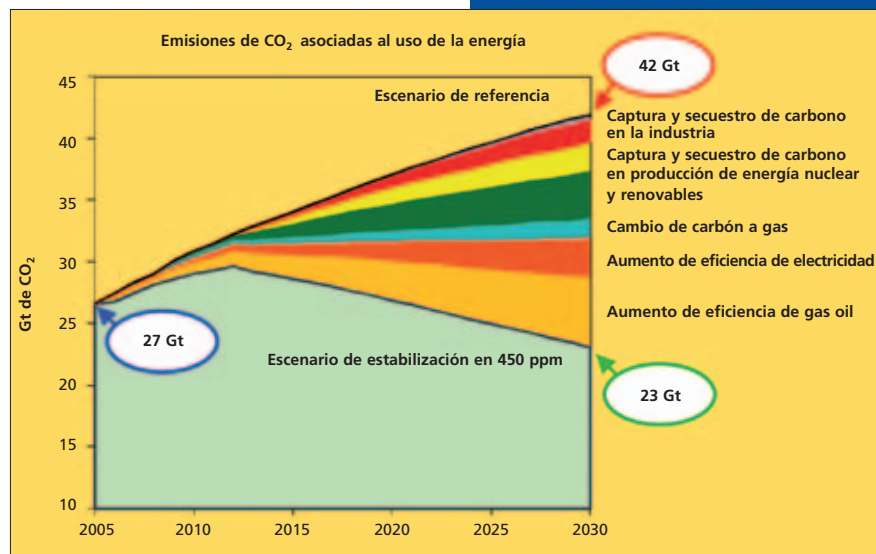


Figura 9.2. Esfuerzo de reducción de emisiones a realizar hasta el 2030.

Fuente: 3, IEA, WEO, noviembre 2007.

fósiles utilizados hoy en el mundo para dotarnos de energía primaria (figura 9.1). Puesto que los tres primeros factores son difíciles de reducir drásticamente, se puede decir que el problema de las emisiones de CO₂ es hoy un problema de energía primaria: no podemos prescindir de un gran flujo de energía primaria y hemos fracasado hasta la fecha en la búsqueda de fuentes de energía primaria de la suficiente calidad (bajo coste, continuidad de suministro) que sustituyan a los combustibles fósiles (ver figura 9.1). Todas las previsiones mantienen a los combustibles fósiles como la fuente dominante de energía primaria en la primera mitad de este siglo XXI. Si no se hace nada, el mundo



El coordinador de esta obra contemplado el
océano Pacífico en Las Cruces, Chile.

Fotografía: S. Agustí.



va a seguir quemando de forma masiva carbón, petróleo y gas, porque a pesar de los precios crecientes de estos combustibles, continúan siendo la fuente de energía primaria más barata y accesible, tanto para países desarrollados como para grandes países en vía de desarrollo (i.e. China e India) con enormes reservas de carbón.

Para complicar más las cosas, no tenemos mucho tiempo para esperar al lento desarrollo y posterior despliegue de nuevas soluciones, sostenibles y definitivas, al problema de suministro de energía primaria. Se investiga en todo el mundo en prometedores procesos de fusión nuclear, en sistemas más eficaces y baratos de aprovechar las fuentes dispersas e intermitentes de energía renovable y transformarlas en electricidad o hidrógeno. Se investiga también en redes energéticas y dispositivos finales (automóviles de hidrógeno) más eficaces. Todo el mundo está de acuerdo en que estas soluciones deben suministrar en el largo plazo la energía necesaria para sostener y aumentar el grado de bienestar en las sociedades futuras. Pero no parece que estas tecnologías vayan a llegar a tiempo para resolver el desafío de reducción de emisiones que debe abordarse en las próximas dos décadas para estabilizar la concentración en 450 ppm y prevenir calentamientos medios superiores a 2°C.

La infraestructura energética mundial se muestra en la figura 9.3 (Marbán, Valdés-Solís, 2007). Como puede verse, el sistema energético está constituido por tres grandes bloques, correspondiendo cada uno de ellos a una ingente cantidad de equipos y dispositivos (desde las centrales térmicas y refinerías hasta los automóviles y hogares que consumen los productos energéticos elaborados, como la electricidad o la gasolina). Esta infraestructura sigue creciendo y regenerándose en todo el mundo, y sus componentes tienen vidas útiles que pueden llegar a varias decenas de años. Por lo tanto, hay que reconocer que cualquier transformación de fondo del sistema energético va a ser lenta. No tenemos tiempo para esperar el lento despliegue de soluciones radicales, incluso si se demostrase el éxito de las mismas hoy. La reducción real de emisiones de CO₂ es posible, pero pasa por acometer los objetivos de reducción haciendo uso de tecnologías conocidas actualmente. Aunque hay muchas publicaciones anteriores intentando cuantificar el esfuerzo que supone la necesaria transformación del sistema energético, el trabajo de Pacala y Socolov (5) caracterizando distintas “cuñas tecnológicas” (como en figura 9.2) ha tenido un gran impacto. Su idea clave es la urgencia del despliegue a gran escala de aquellas tecnologías de bajas emisiones de carbono de las que

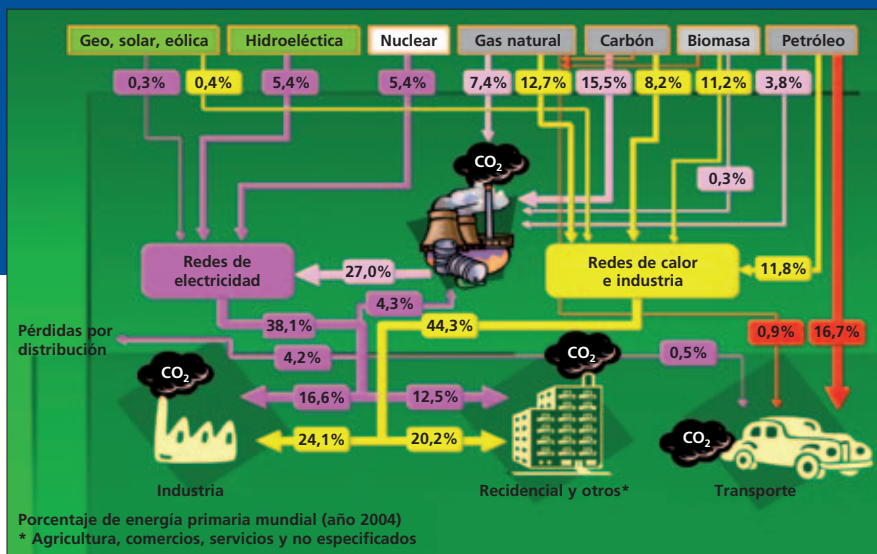


Figura 9.3. Esquema del sistema de energía mundial. El bloque superior corresponde a las fuentes primarias de energía, usadas para elaborar productos energéticos (electricidad, combustibles de automoción, calor de calefacción e industrial, etc.) que se distribuyen en redes (bloque central). El bloque inferior corresponde a la producción de bienes y al consumo directo de productos energéticos finales en transporte, edificios y otros.

Fuente: Marban, Vales-Solis, 2007.

ya sabemos lo suficiente como para acometer dicho despliegue.

9.3. Opciones reales de reducción de emisiones de CO₂

La figura 9.2 ya resume las opciones disponibles para reducir emisiones de CO₂, así como su posible impacto cuantitativo en el esfuerzo global de reducción de emisiones a realizar desde hoy hasta el 2030, calculado mediante un modelo de prospectiva de la Agencia Internacional de la Energía (nov. 2007). Hay otros modelos que responden a escenarios y suposiciones distintas, pero cualitativamente, y en el medio plazo, los escenarios más realistas

incluyen siempre el siguiente portafolio de opciones:

- *Ahorro energético.* En el caso de la figura 9.2, la potencial contribución del ahorro (promovido por precios crecientes de energía) ya está incluida en el escenario de referencia. Pero hay un sinfín de posibles políticas destinadas a promover el ahorro en el uso final de la energía (en general, políticas progresivas de impuestos para los hábitos y productos de máximo consumo de energía).
- *Eficiencia energética.* Aunque hay una ley física que limita nuestra capacidad de transformar energía primaria en energía útil, hay un gran potencial de reducción de emisiones haciendo el sistema energético más eficiente. Los altos costes de la energía primaria hacen rentable los dispositivos de máximo rendimiento e incluso la sustitución antes del final de su vida útil de los dispositivos de menor rendimiento. Pero para conseguir los niveles de eficiencia necesarios para cubrir objetivos de mitigación

ambiciosos (como en la figura 9.2) son necesarias además políticas decididas que catalicen estos mecanismos. La eficiencia debe extenderse a toda la cadena que va desde la transformación de la energía primaria en un producto energético útil (un kwh eléctrico, un litro de combustible, etc.) hasta el consumo y uso de productos de mayor rendimiento energético (automóviles híbridos, iluminación y electrodomésticos de bajo consumo, materiales reciclados, etc.).

- *Utilización de renovables como fuente de energía primaria.* A largo plazo ésta es la única solución sostenible, por lo que es razonable iniciar la transición hacia un sistema energético basado en fuentes de energía renovables (flujos de agua y viento, radiación sol, fuentes geotérmica de calor, biocombustibles, etc.). Sin embargo, exceptuando la hidráulica de gran escala, su naturaleza dispersa y/o intermitente origina un problema fundamental de escala y costes que las hace inviables a corto plazo para cubrir un gran porcentaje de la demanda energética (ver figuras 9.1 y 9.2). En países en vías de desarrollo, que requieren para su desarrollo una gran intensidad energética y mínimos costes de energía, es muy improbable que se desplieguen las energías renovables a medio plazo.

- *Utilización de energía nuclear.* Tiene emisiones específicas de CO₂ prácticamente nulas. Cobra gran importancia en muchos países por su valor estratégico para reducir la dependencia energética exterior y generar electricidad a bajo coste (cuando que no se internalizan los costes de la gestión de residuos a largo plazo). Es rechazada en muchos otros países por la opinión pública. En cualquier caso, aunque sea una obviedad, hay que decir que los países que renuncian a esta opción tienen que cubrir su capacidad de mitigación con otras opciones.
- *Captura y almacenamiento de CO₂.* Consiste en transformar un proceso a gran escala (y gran emisor de CO₂), en un proceso que genera el mismo producto pero generando una corriente paralela muy concentrada de CO₂ susceptible de compresión, transporte y almacenamiento geológico permanente. Al ser poco conocida, y ser el área de trabajo del autor, se discute con más detalle en el punto siguiente.

9.4. La captura y almacenamiento de CO₂ como transición hacia un sistema energético sostenible

Teniendo en cuenta la naturaleza fósil de las fuentes de energía primaria (figura 9.1) y las perspectivas en las

próximas décadas, está claro que la captura y almacenamiento geológico permanente de CO₂ (CAC) puede ser una poderosa herramienta de mitigación de cambio climático. El IPCC ha evaluado en un reciente Informe Especial (IPCC, 2005) las tecnologías existentes y emergentes de captura y almacenamiento de CO₂ y ha concluido que en la mayor parte de los escenarios de estabilización entre 450 y 750 ppmv las tecnologías CAC contribuirían entre el 55 y el 15% al esfuerzo mundial de mitigación acumulativo hasta 2100. En Europa, los primeros grandes proyectos de demostración (a escalas de varios centenares de MWe) se han anunciado ya en varios países. La CAC es prioritaria en el 7 Programa Marco de Investigación de la Unión Europea, y la Comisión Europea ha elevado a comienzos de 2007 al Consejo Europeo y al Parlamento Europeo un documento que reconoce un papel para la CAC en Europa tan importante como el del desarrollo de las renovables o de la eficacia energética en la lucha para reducir las emisiones de CO₂ de aquí al año 2050. De hecho, los escenarios manejados por la UE, predicen un implantación casi total de la CAC en el sector eléctrico europeo para el 2030 iniciado con la construcción de una docena de plantas de demostración de diferentes tecnologías y localizaciones entre el 2015 y el 2020 (SEC, 2007).

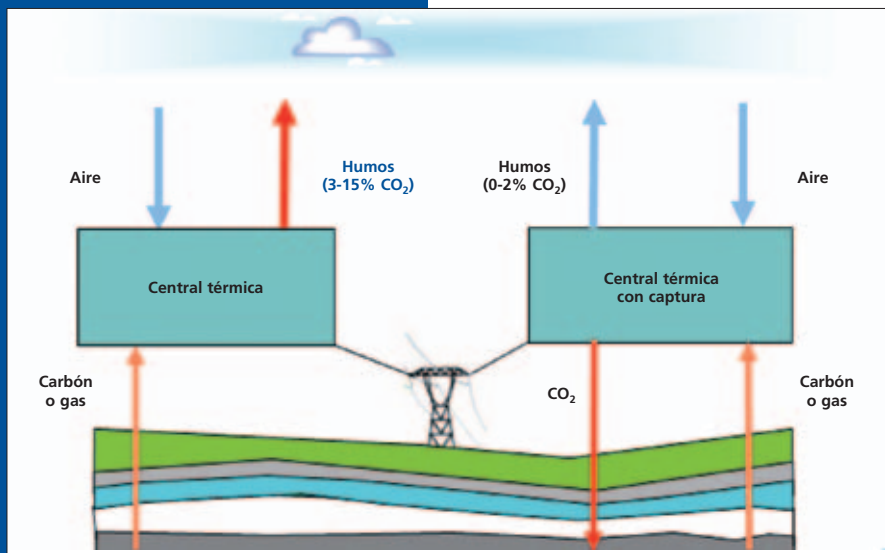


Figura 9.4. Esquema de la captura y almacenamiento geológico de CO_2 aplicado a una central térmica. El CO_2 casi puro separado en la central, y comprimido en forma muy densa, se inyecta a formaciones sedimentarias profundas que contienen fluidos aislados desde hace millones de años (gas natural, petróleo o agua salada, mucho más frecuente).

Las grandes centrales térmicas, cementeras, refinерías, acerías, etc., son procesos diseñados hasta hoy para obtener uno o varios productos energéticos (electricidad, calor) o químicos a gran escala, emitiendo CO_2 a la atmósfera como subproducto. En España se emite una tercera parte de las emisiones totales desde este tipo de fuentes y este porcentaje es parecido a nivel mundial (figura 9.3). El desafío para cualquier tecnología de captura es transformar estos procesos existentes (o “sistemas de referencia”) en sistemas que generan el mismo producto pero con una corriente de CO_2 separada y comprimida para su confinamiento (“sistema con captura”). Los principales destinatarios de las tecnologías de

captura son el sector eléctrico e industrial, pero hay que destacar que las tecnologías CAC permitirían también transformar combustibles fósiles de alto contenido en carbono (como carbón) en combustibles para automoción limpios (de bajo o nulo contenido en carbono como el metanol o el hidrógeno). De hecho, el desarrollo de las tecnologías CTL (*Coal to Liquids*) están recibiendo un gran impulso en países como EE.UU. y China, con grandes reservas de carbón y deseosos por razones estratégicas de reducir su dependencia de las importaciones de crudo. También se están desplegando rápidamente tecnologías de explotación de petróleos no convencionales (como las arenas bituminosas de Canadá) para su transformación en combustible de automoción. Al ser tecnologías con emisiones intrínsecas de CO_2 muy altas, el despliegue a gran escala de estas tecnologías sin captura y almacenamiento de CO_2 haría imposible cualquier intento de reducir emisiones de CO_2 en otras partes del sistema energético. En el plano positivo, la aplicación de tecnologías de captura y almacenamiento de CO_2 a grandes centrales de biomasa, haría de estas centrales sumideros netos de CO_2 de la atmósfera (por capturar y almacenar el CO_2 absorbido por la biomasa durante su crecimiento).

Por definición, todos los sistemas de captura de CO_2 incluyen siempre un

Investigadores españoles junto al glaciar
Johnson, isla Livingston, Antártida.

Fotografía: A. Tovar.

proceso de separación de gases a gran escala, que suele suponer $3/4$ partes del coste total de mitigación. Esta separación de gases no es necesariamente una separación de CO_2 . De hecho, los sistemas de captura de CO_2 se suelen clasificar en función del lugar donde se sitúa la gran etapa de separación de gases en el sistema y del tipo de gas que se separa en los mismos (post-combustión, precombustión, oxi-combustión). Los costes de captura de CO_2 se sitúan entre $30\text{-}50\text{?}/\text{tCO}_2$ evitada, según el informe especial del IPCC sobre el tema (IPCC, 2005). Para el sector eléctrico, esto supondría un aumento de costes de generación de unos $0.02\text{?}/\text{kWhe}$. Todos ellos se refieren al uso de tecnologías existentes, usando centrales térmicas de referencia nuevas, de muy alto rendimiento, donde se pueden absorber mejor las importantes pérdidas de rendimiento asociadas a la etapa de captura de CO_2 con las tecnologías existentes. Éste es uno de los talones de Aquiles de las tecnologías CAC aplicadas a sistemas de combustión: la captura por métodos

probados incurre en 10-15 puntos de pérdida de rendimiento neto. Esto hace inviable (o indeseable económicamente) la aplicación de las tecnologías CAC a la mayoría de las centrales ya existentes. Incluso para centrales de combustión nuevas de última generación, las tecnologías actuales de captura obligan a aumentos del 20-35% del consumo de combustible para generar una misma potencia eléctrica. Existe una gran actividad de investigación en todo el mundo en la búsqueda de tecnologías

de captura con menores costes y menores penalizaciones de rendimiento. El CSIC fue pionero en el desarrollo de tecnologías de carbonatación-calcinación para separar CO_2 a altas temperaturas y en el desarrollo de procesos de combustión con transportadores de O_2 .

Una vez capturado el CO_2 en forma pura y a muy altas presiones, es viable su transporte a grandes distancias (>500 km), y de hecho esto ya se hace de forma rutinaria en muchos campos





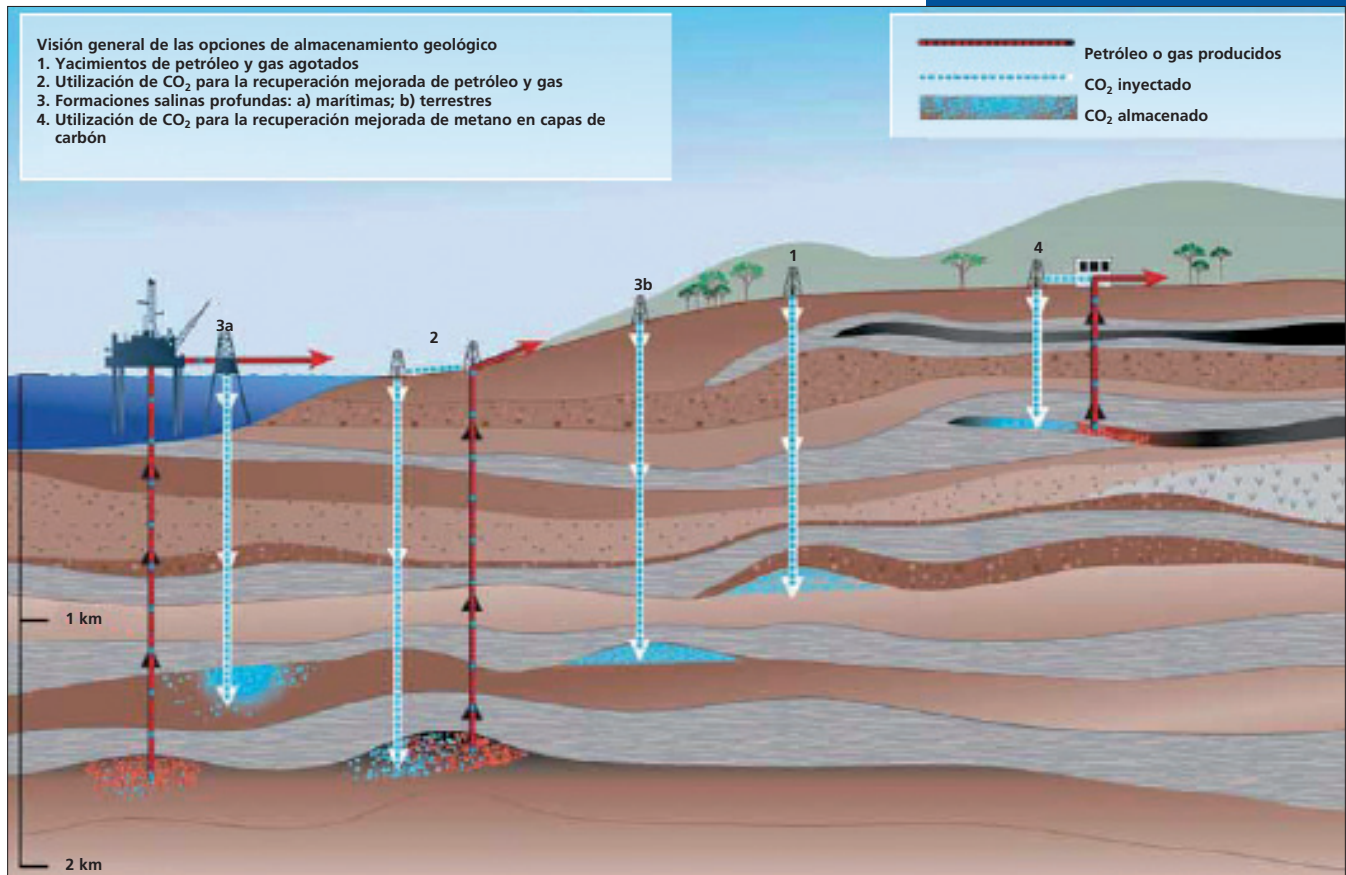
El buque de investigación oceanográfica *Hespérides* cobrando una boya con muestras biológicas.

Fotografía: C. M. Duarte.

petrolíferos de EE.UU. y Canadá. Pero se requieren grandes escalas ($>10\text{MtCO}_2/\text{año}$) para mantener los costes por debajo de unos pocos €/t CO_2 . El transporte a escala internacional sólo sería factible en un escenario de amplio despliegue de tecnologías CAC. Por tanto, todos los grandes proyectos de captura en las próximas dos décadas necesitan identificar un lugar de almacenamiento próximo a la fuente de donde se captura el CO_2 . Se han hecho muchas propuestas de almacenamiento de CO_2 . De hecho, la primera publicación en 1978 sobre CAC (Marchetty, 1977) proponía la inyección de una gran parte del CO_2 capturado en Europa en una gigantesca corriente de agua densa que se sumerge desde el Mediterráneo al Atlántico en el estrecho de Gibraltar. Pero todas estas opciones no han resistido al análisis en detalle de las mismas y la única opción realista de almacenamiento masivo de CO_2 para la mitigación del cambio climático es su confinamiento en depósitos geológicos naturales profundos (a más de 800 m de profundidad).

La industria del gas y del petróleo tiene una gran experiencia en la caracterización y uso de grandes almacenes geológicos de gases. De hecho, los grandes yacimientos de gas y de petróleo agotados son la opción más atractiva de almacenamiento masivo de CO_2 , ya que son formaciones

sedimentarias en las que ha habido fluidos a altas presiones almacenados durante millones de años (ver figura 9.5). En España, al no haber grandes yacimientos de gas o de petróleo, la opción más atractiva son las formaciones salinas profundas. Éstas suelen aparecer en todas las cuencas sedimentarias del mundo. Consisten en capas de sedimentos porosos (similares a las que contienen petróleo o gas) que alojan en sus poros gran cantidad de agua salada o salmuera. Dichas capas son capaces de aceptar cantidades ingentes de CO_2 dependiendo del tamaño y características de la capa y del mecanismo por el que el CO_2 es retenido (trampa hidrodinámica gracias a capas no porosas superiores, disolución en la salmuera, solidificación por reacción con componentes de la salmuera, etc.). Como ejemplo, se ha estimado que una única formación de este tipo (Utsira, en Noruega) donde se llevan inyectando 1 Mt $\text{CO}_2/\text{año}$ desde 1996, podría almacenar todas las emisiones de CO_2 en Europa de los próximos 100 años. La capacidad mundial de almacenamiento en formaciones salinas profundas estaría entre 1.000 y 10.000 Gt CO_2 . Las estimaciones de capacidad se reducen a medida que los criterios de selección de un emplazamiento se endurecen para garantizar que el CO_2 no escapa en escalas de tiempo razonables para resolver el problema de mitigación (varios miles de años).



Las tecnologías necesarias para la búsqueda, caracterización, sondeo, inyección y monitorización de CO₂ en el subsuelo están ya muy desarrolladas en la industria del gas y del petróleo y su coste es conocido, aunque varía mucho (entre 0.5-10 €/tCO₂) dependiendo de las características de la formación geológica a estudiar y de la escala del proyecto.

En lo que se refiere a riesgos, hay dos tipos de riesgos en la aplicación de CAC: riesgos locales (debidos a fugas repentinas) y riesgos globales (por un deficiente funcionamiento del almacén de CO₂, con multitud de fugas dispersas). Como con otros gases inertes, la liberación de una gran cantidad de CO₂ en un ambiente

Figura 9.5. Métodos para almacenar CO₂ en formaciones geológicas profundas.

Fuente: IPCC, 2005.

confinado, desplazando el oxígeno del aire, puede causar la muerte. Pero este riesgo se minimiza con normativas de prevención y detección similares a las aplicadas para otros gases más peligrosos, como el gas natural, habituales en nuestras vidas. Los riesgos globales (fugas dispersas del almacén) suponen un problema de asignación de responsabilidades, ya que la detección de una fuga puede producirse mucho más tarde que el periodo de autorización de inyección de CO₂ en el almacén.

Cómo comparar y elegir entre opciones de mitigación

El primer problema al que se enfrenta el despliegue masivo de tecnologías de bajas emisiones de CO₂ es la competencia con los bajos costes de la energía primaria obtenida en el sistema energético fósil actual. Es importante distinguir entre el coste de un producto energético y su precio (más volátil y sujeto a mecanismo de mercado). Por ejemplo, el hecho de que los precios del barril de petróleo se acerquen a 150 dólares hoy, no está relacionado con un aumento de los costes de producción de petróleo, que de hecho se mantienen muy por debajo de 10 dólares por barril en los principales campos petrolíferos del mundo. En ausencia de incentivos económicos en forma de subvenciones, de impuestos, o de un mercado global de carbono, ninguna opción de bajas

emisiones de CO₂ puede poner en peligro el dominio actual de los combustibles fósiles en el sistema energético. A pesar de sus precios crecientes, los recursos fósiles son todavía relativamente abundantes, y al ritmo de consumo actual pueden durar varias décadas en el caso del petróleo y del gas y varios siglos en el caso del carbón (BP Statistical, 2008). En el caso del carbón, las reservas están muy distribuidas geográficamente y su consumo sigue creciendo (un 4,5 % en el 2006). Es paradójico que, a pesar de la aparente disposición política en muchos países a firmar acuerdos de reducción de emisiones de CO₂, consideraciones geopolíticas de mucho peso relacionadas con la seguridad de suministro, están produciendo un repunte del carbón como fuente de energía primaria (BP Statistical, 2008) en esos mismos países (Reino Unido, Dinamarca...), a pesar de ser el combustible con mayores emisiones específicas de CO₂.

Por otra parte, en el caso del petróleo y del gas, existen trabajos (Sinn, 2008) que cuestionan el impacto real sobre la reducción de emisiones globales de CO₂ de la reducción de su consumo sólo en ciertos países desarrollados. Según este trabajo, existen mecanismos de mercado muy conocidos para estas

materias primas que corregirían el precio para mantener o incluso aumentar la oferta y así garantizar a toda costa un mismo nivel de ingresos de los que controlan la producción. El resultado sería petróleo y gas más barato que se destinaría en una mayor proporción a países en vías de desarrollo, pero que acabaría también como CO₂ en la atmósfera. En este contexto, puede no ser realista intentar alcanzar un objetivo de reducción de emisiones fijado en la figura 9.2 sin desacoplar el uso de los combustibles fósiles de sus emisiones de CO₂, sólo posible mediante un poder global que limite y controle la extracción de estos recursos fósiles (opción utópica a medio plazo) o mediante tecnologías de muy alto rendimiento en las transformaciones energéticas acopladas a procesos de captura y almacenamiento de CO₂.

En cualquier caso, la sustitución del sistema de combustibles fósiles emisor de CO₂ actual por un sistema sin emisiones de CO₂ va a suponer una formidable inversión en nuevas tecnologías en las próximas décadas. La inversión va a ser muy rentable porque cuando se incluyen los costes ambientales de la inacción, es decir, de la no sustitución, la energía obtenida de combustibles fósiles con emisión de CO₂ es, sin duda, la más costosa de las disponibles.

Como indica la figura 9.6, el coste de producir energía útil proveniente de un sistema energético emisor de CO₂ es, salvo aplicaciones nicho, más bajo que el coste obtenido con tecnologías no emisoras, y es muy probable que permanezca así en las próximas décadas hasta agotar las reservas explotables de combustibles fósiles. Las expectativas de bajos costes para tecnologías emergentes (incluyendo las emergentes en el sector fósil) están sujetas a incertidumbre. Existe un problema de transparencia en muchos trabajos que comparan costes de mitigación (en términos de coste de la tonelada de CO₂ evitada) o costes de productos energéticos (como el kwh de electricidad) generados con tecnologías muy diferentes. Para que las comparaciones tengan sentido, y se puedan adoptar decisiones políticas de acuerdo a dichas comparaciones, hay que definir los costes con un marco razonable de suposiciones sobre parámetros que definen el entorno financiero y regulador en una localización concreta (tipos de interés, costes laborales, costes de permisos, etc.). También deben compararse con cautela tecnologías de muy diferente naturaleza y grado de madurez. Por último, la elección del sistema de referencia (normalmente fósil) debe realizarse con transparencia y

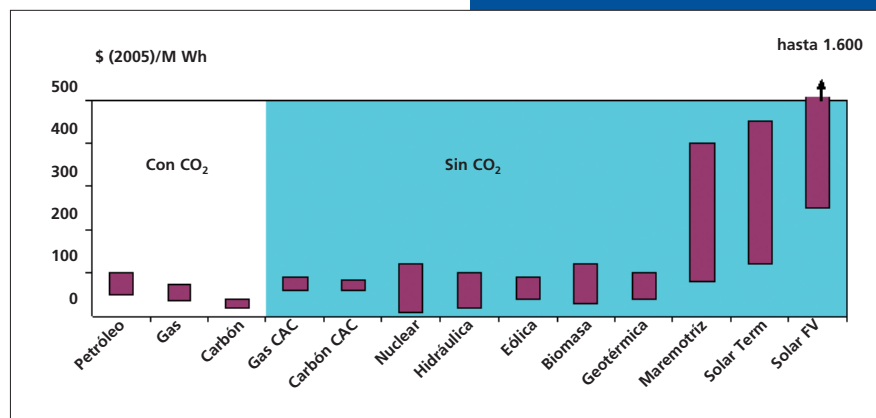


Figura 9.6. El coste de la energía útil a partir de distintas fuentes primarias.

Fuente: IPCC, AR4, 2007, WGIII, tabla 4.7.

realismo (comparando tecnologías nuevas sólo con tecnologías fósiles nuevas). Por ello, las comparaciones de costes más fiables suelen provenir de organismos internacionales que filtran y sintetizan un gran número de datos y están sujetos a criterios de revisión estrictos. La tabla 9.1 es una recopilación de costes realizada en el último Informe del IPCC, que resume los costes para obtener energía útil (en forma de electricidad u otro producto energético) a partir de distintas fuentes de energía primaria y con tecnologías actuales.

La simple observación de la figura 9.6 permite concluir que una apuesta precipitada por el despliegue a gran escala de tecnologías limpias (sin emisión de CO₂), antes de alcanzar su madurez tecnológica, supone destinar un gran volumen de recursos (públicos o privados) para

un impacto limitado en la reducción de emisiones, comparado con otras opciones de mitigación igualmente limpias. Podemos comparar, por ejemplo, el alto coste de las tecnologías solares frente al coste

competitivo de la energía eólica. Es por tanto muy delicado apostar por el despliegue de energías limpias de alto coste cuando hay opciones “igualmente limpias” capaces de evitar la emisión de mucho más CO₂ con el

mismo coste. Si se tiene en cuenta la urgencia de reducir emisiones de CO₂ a nivel global, el debate energético y de mitigación debe ir siempre asociado a un debate de costes.

Referencias

- An Energy Policy for Europe* (2007). Communication from the Commission to the European Council and the European Parliament. SEC(2007), 12, 2007,
- BP Statistical (2008). Review of World Energy, 2008.*
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2007). *Key world energy statistics, 2007.*
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2007). *World Energy Outlook 2007, noviembre 2007.*
- IPCC (2005). *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Intergovernmental Panel on Climate Change; Cambridge University Press, 2005.*
- IPCC. *Climate Change 2007. Mitigation. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Fourth Assessment Report, Cambridge University Press.*
- MARBÁN, G; VALDÉS-SOLÍS, T. (2007). *Towards the hydrogen economy?, pp. 1625-1637.*
- MARCHETTY, C. (1977). *Climate Change, 1, IIASA, pp. 59-68.*
- PACALA, S. and SOCOLOW, R. (2004). “Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies”, *Science*, 305.
- SINN, H. W. (2008). “Global warming: The neglected supply side”. Chapter 5 in *The EEAG Report on the European Economy. Europe in a Globalised World.*

10. ¿Cómo afrontar el cambio global?

Mitigación y adaptación al cambio global

“Si no desviamos nuestros pasos probablemente acabemos donde nos dirigimos.”

Proverbio chino

Para el sociólogo americano Alvin Toffler la humanidad después de la revolución agrícola e industrial ha entrado en lo que denominó la “tercera oleada” o la revolución tecnológica. Para Toffler es un periodo definido por un estilo de vida que caracteriza a la civilización del siglo XXI altamente tecnológica, economicista y antiindustrial, que genera cambios radicales, profundos y globalizantes. El problema no es el cambio, la humanidad se ha construido en un ambiente cambiante, sino la aceleración de un cambio profundo y global para el

que ni el ser humano ni sus instituciones están preparadas. Para afrontar el problema del cambio global, que líderes mundiales identifican como el mayor reto que la humanidad ha de afrontar, es preciso, en primer lugar, reconocer claramente el problema, sus causas y sus incertidumbres, y fomentar, desde los distintos niveles de la sociedad, desde los ciudadanos a las políticas, actitudes adaptativas que permitan afrontar este problema con éxito. En esta sección ofrecemos algunos pensamientos y pautas sobre cómo conseguir esta capacidad adaptativa.

10.1. Cómo construir capacidad adaptativa frente al cambio global

El científico y divulgador norteamericano Jared Diamond en su reciente libro de gran éxito, *Colapso* (2004), argumenta que la capacidad de unas sociedades para perdurar mientras otras desaparecen depende fundamentalmente de su capacidad adaptativa en términos de cambio social. En base al estudio de múltiples casos documenta cómo las sociedades que no fueron capaces de adaptarse a cambios graduales y catastróficos, casi siempre asociados a impulsores de cambio de carácter ecológico ya fueran de origen humano como el deterioro ambiental (destrucción de ecosistemas, sobreexplotación de recursos, extinción de especies) o debidos a procesos naturales como cambios climáticos, sufrieron un drástico descenso del tamaño de su población y de su complejidad política, económica y sociológica llegando muchas de ellas a desaparecer. A diferencia de lo que ha ocurrido en la historia de la humanidad, en esta nueva era del Antropoceno la coevolución entre naturaleza y sociedad tiene lugar a escala planetaria y a una velocidad mucho más rápida y con consecuencias más impredecibles que en el pasado.

Seguimos y seguiremos necesitando servicios de aprovisionamiento, como alimentos, madera, agua, fibra, combustible, etc., pero sobre todo y a

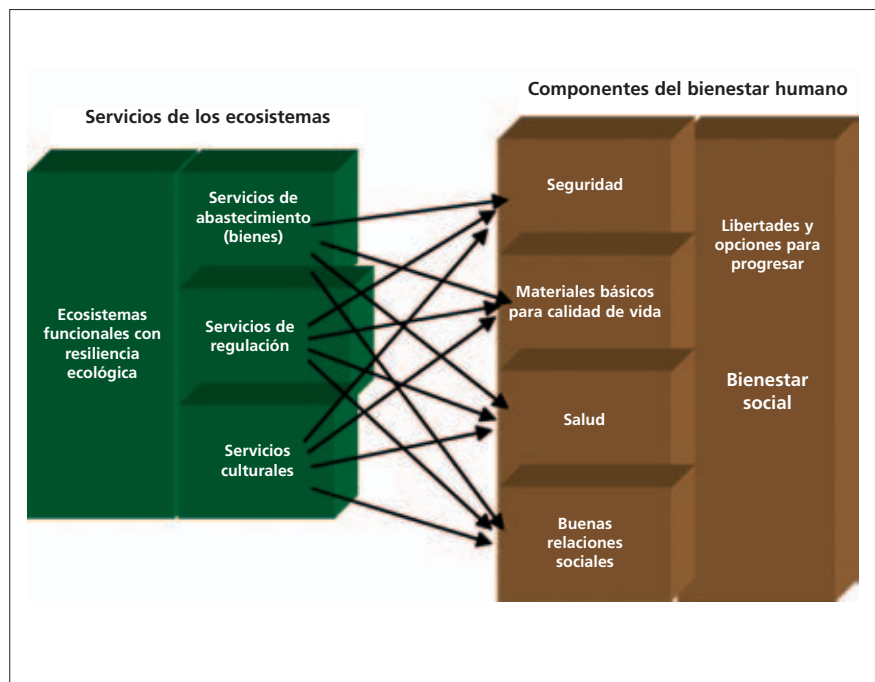


Figura 10.1. Existe una interdependencia entre humanos y ecosistemas que se manifiesta en la variedad del flujo de servicios que éstos generan a la humanidad y determinan el bienestar de sus sociedades. Los cambios tanto locales como globales afectan a este flujo de servicios con consecuencias en la economía, la salud, las relaciones socioculturales, las libertades y la seguridad de los humanos.

Fuente: Millennium Ecosystem Assessment, 2005, modificada.

pesar de que sean invisibles para el mercado y no tengan precio, seguiremos dependiendo de los servicios de regulación, como son el secuestro de carbono para el control del sistema climático, de la polinización para la producción de las cosechas, de la depuración del agua, de la formación de suelo, de la regulación de enfermedades, de la asimilación de nutrientes, etc. Tampoco podemos olvidarnos del valor

social de los servicios culturales de los ecosistemas reflejados en sus valores estéticos, educativos, de recreación o espirituales. De hecho, el *Informe Stern* sobre el impacto económico del cambio global (Stern team, 2006) califica el cambio global de fracaso colosal de la economía de mercado, pues se generan grandísimos daños económicos a través de procesos que inciden fundamentalmente en bienes ajenos al sistema de mercado.

Hoy sabemos que para poder disfrutar de los servicios de los ecosistemas lo importante no es gestionar correctamente los servicios de aprovisionamiento o de regulación sino conservar o restaurar las funciones o procesos ecológicos esenciales que los soportan (figura 10.1). Necesitamos mantener ecosistemas sostenibles, es decir, sistemas naturales que conserven sus funciones biogeofísicas (producción primaria, ciclo de nutrientes, ciclo del agua). En esta necesidad reside el desafío actual del uso humano del capital natural del planeta. El problema esencial al que se enfrenta la civilización de inicios del milenio es cómo gestionar la resiliencia, o capacidad de recuperación frente a perturbaciones como las asociadas al cambio global, de los ecosistemas, para asegurar un desarrollo social y económico en el contexto de un mundo rápidamente cambiante. De una forma simple, la resiliencia ecológica hay que entenderla como la capacidad de un sistema ecológico de conservar sus funciones mientras soporta perturbaciones. Los ecosistemas resilientes son capaces de absorber perturbaciones externas y acontecimientos no previstos. Tienen capacidad para amortiguar perturbaciones, renovarse y reorganizarse después de un cambio. Un ecosistema sin resiliencia es vulnerable a perturbaciones externas y está sometido a una amplia variedad de tensiones y cambios. Carece de capacidad para adaptarse y modular los cambios por lo que no es capaz de reducir los daños

que pueda sufrir en el futuro. Gestionar la resiliencia de los ecosistemas tiene por tanto consecuencias en la subsistencia, la vulnerabilidad, seguridad y conflictos de la sociedad humana.

La resiliencia de los ecosistemas reside en las interrelaciones que se establecen entre sus componentes geóticos y bióticos. En este contexto la biodiversidad juega un papel esencial en el mantenimiento de la resiliencia de los ecosistemas. Este papel está relacionado con la diversidad y el número de individuos de grupos funcionales de especies en un ecosistema (biodiversidad funcional), es decir, de los organismos que polinizan, depredan, fijan nitrógeno, dispersan semillas, descomponen la materia orgánica, transforman la energía lumínica en química, capturan o emiten CO₂, etc. La pérdida de grupos funcionales tendrá un efecto directo e intenso sobre la capacidad de los ecosistemas de reorganizarse después de una perturbación.

A la luz de los resultados de múltiples estudios científicos realizados sobre los efectos de las actividades humanas en la estructura, funcionamiento y dinámica de los ecosistemas acuáticos y terrestres del planeta emergen, en el contexto del cambio global, dos errores fundamentales relacionados con los pilares que sustentan la mayoría de las políticas de gestión de los sistemas naturales (Folke, 2004). El primer error está relacionado con la presunción de que las respuestas de los

ecosistemas al uso humano son lineales, predecibles y controlables. El segundo está relacionado con el supuesto de que los humanos y la naturaleza son entidades diferentes que pueden ser conceptualizadas y gestionadas independientemente. Sin embargo las evidencias acumuladas en diversas regiones del planeta sugieren por un lado que los comportamientos de las relaciones naturaleza-sociedad no son lineales y muestran umbrales que de sobrepasarse devienen en cambios muy pronunciados. Por otro lado la naturaleza y la sociedad hay que conceptualizarlas como un sistema socioecológico o socioecosistema dado que la sociedad humana es parte de la biosfera y sus actividades están ensambladas en el sistema ecológico.

Todos los ecosistemas del planeta están sometidos a los distintos componentes del cambio global pero la percepción de sus efectos y cómo abordarlos difiere según dos modelos de gestión fuertemente contrastados. Desde las políticas de gestión más tradicionales se asumen una respuesta gradual, suave y predecible al cambio global y sus componentes. Se supone que la naturaleza está o tiende a un estado de equilibrio o casi equilibrio y el modelo de gestión óptimo denominado "Dominio y Control" (Holling & Meffe, 1996) se relaciona con actividades que conduzcan al sistema natural hacia un estado de equilibrio canónico o clímax que hay que mantener. Se busca situaciones de

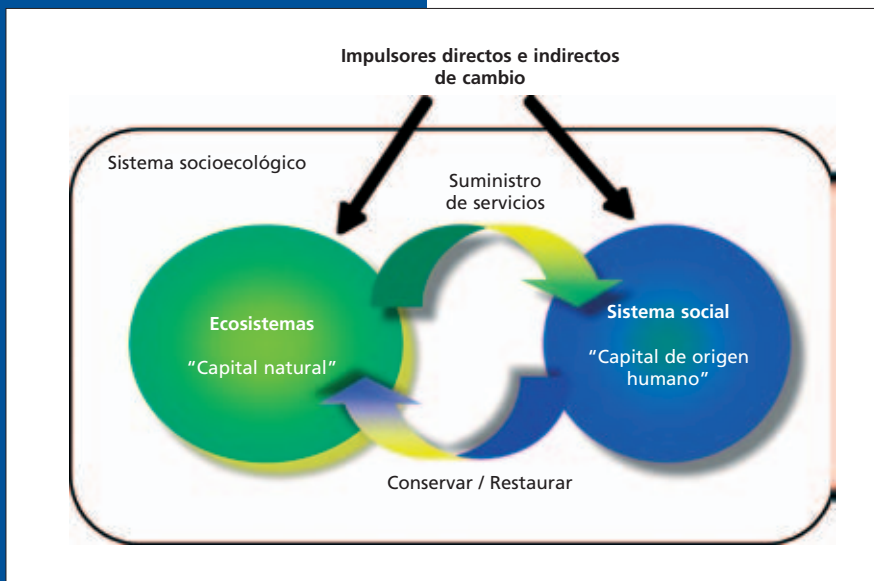


Figura 10.2. Desde el concepto de socioecosistema, los humanos y los ecosistemas constituyen un sistema e interactúan de manera interdependiente a una escala local y global. Bajo esta trama conceptual de ver las interrelaciones (el bosque) en vez de sus componentes aislados (los árboles) podemos desarrollar las políticas del cambio global con mayor eficacia al abordar los problemas con toda su complejidad.

mínima complejidad e incertidumbre en un contexto cambiante. Todo cambio se considera una degradación. Hay que “conservar lo que cambia” por lo que es necesario controlar las perturbaciones naturales o sus efectos como fuegos, inundaciones, sequías, huracanes, etc.

En oposición al modelo de “Dominio y Control” se encuentra el modelo de la “Gestión de la Resiliencia”. Desde esta perspectiva los cambios lineales y suaves son interrumpidos de forma repentina y drástica por perturbaciones naturales que, a menudo, no se pueden predecir ya que presentan un comportamiento estocástico, como es el caso de huracanes, fuegos, sequías, etc. Estos eventos discretos en el espacio y en el tiempo

(aunque hay espacios y tiempos con más probabilidades por razón de las actividades humanas) desencadenan cambios de estado en los ecosistemas que no se pueden predecir con mucha certeza. Estos cambios de estados hoy sabemos que son una característica inherente a los sistemas complejos adaptativos como es el caso de la biosfera.

Por tanto, la forma más práctica y efectiva de enfrentarse al desafío del cambio global y a sus componentes es construir resiliencia, de los estados deseados de los ecosistemas, es decir, de aquellos cuadros ecológicos que tienen mayor valor social en términos de la calidad del flujo de servicios ecosistémicos. Desde el modelo de la gestión de la resiliencia, los humanos y la naturaleza no son entidades independientes sino que conforman un sistema denominado sistema socioecológico o socioecosistemas por lo que tienen que ser gestionados como un todo, como entidad integrada y unitaria. Los socioecosistemas son ecosistemas que de una forma compleja se vinculan e interaccionan de manera dinámica e interdependiente con uno o más sistemas sociales (figura 10.2).

El concepto socioecosistema aporta una visión global de la complejidad de los problemas que implica el cambio global que sirve para tender puentes entre las ciencias biogeofísicas, sociales y las tecnologías, generando un marco transdisciplinar que permite a ecólogos,

economistas, sociólogos e ingenieros compartir no sólo el objeto y objetivo de los programas sobre cambio global sino también un marco conceptual y metodológico. Facilita la toma de decisiones ya que permite integrar las dimensiones biogeofísicas y sociales del cambio global a través del conocimiento de la organización, funcionamiento y dinámica de los sistemas ecológicos, y de la incorporación de aspectos económicos, sociológicos y políticos de la componente humana del cambio global. Desde esta aproximación un socioecosistema es sostenible si es resiliente, es decir, si conserva las capacidades adaptativas al cambio creando, innovando, probando a la vez que se generan y se mantienen las oportunidades de autoorganización (Folke *et al*, 2002).

Además del desarrollo de escenario, la otra herramienta esencial con la que cuenta el modelo de la gestión de la resiliencia es la gestión ambiental adaptativa. El camino de la sostenibilidad exige construir capacidad adaptativa de los socioecosistemas para que se puedan ajustar a las nuevas condiciones generadas por los cambios sin perder sus oportunidades de futuro. La capacidad adaptativa de los socioecosistemas está estrechamente relacionada con el aprendizaje. Dado que las relaciones entre naturaleza y sociedad están en continuo cambio es muy difícil predecir

las consecuencias de nuestras acciones de gestión, por lo que una estrategia para abordarlas es tratarlas como hipótesis que permitan su tratamiento posterior como experimentos, de forma que aprendamos haciendo. Si estos experimentos son seguidos y analizados adecuadamente mediante un sistema de indicadores, los gestores pueden aprender sobre la administración de los socioecosistemas en un contexto de cambio, incertidumbres e imprevistos. En este contexto es necesario que las políticas relativas al cambio global promuevan el desarrollo de indicadores de cambios graduales y de alerta temprana que detecten señales de pérdida de resiliencia y de posibles umbrales de cambios de régimen en socioecosistemas frente a presiones.

Por último hay que tener en cuenta que el éxito o fracaso del modelo de gestión adaptativa que promueve la gestión de la resiliencia dependerá de los procesos institucionales y políticos que promuevan los proyectos sobre el cambio global. Por esta razón es importante introducir en las políticas de cambio global el concepto de gobernanza adaptativa para analizar las estructuras y procesos mediante los que los seres humanos tomamos decisiones sobre la gestión de los servicios de los ecosistemas y compartimos su ejecución. Bajo este marco las nuevas políticas del cambio global deberían estimular la creación de foros o espacios participativos para el

análisis y el debate de los problemas y las consecuencias de los cambios en marcha. Se deberían promover plataformas cívicas apoyadas por instituciones abiertas que se apropien y ejecuten modelos de gestión adaptativa para aprender y construir capacidad adaptativa de los socioecosistemas donde se desarrollan las comunidades.

Para Diamond en su libro ya citado sobre el colapso de las civilizaciones, la esperanza de futuro de esta civilización de los albores del tercer milenio radica en saber utilizar algo que no tuvieron las sociedades del pasado que se extinguieron en un total aislamiento; un flujo de información globalizada que nos permite conocer en tiempo real lo que está ocurriendo en cualquier parte del planeta. Por primera vez podemos aprender rápidamente de los errores pero también de los aciertos de las sociedades que nos precedieron y de las actuales por muy remotas que sean. El saber utilizar correctamente esta herramienta de aprendizaje global y con ella construir capacidad adaptativa está en nuestras manos.

10.2. El papel de la ciencia

La contribución de la ciencia es central para comprender, anticipar y reaccionar al problema del cambio global. Esta contribución ha de venir de un esfuerzo científico transdisciplinar, que integre

las múltiples dimensiones del cambio global, desde sus raíces sociopolíticas a la comprensión detallada de los mecanismos biogeoquímicos que intervienen en el funcionamiento de la biosfera que permita formular modelos predictivos fiables, el examen de acontecimientos pasados en la historia del planeta y de la humanidad que nos ofrecen oportunidades para evaluar la fiabilidad de los modelos, a la observación de los síntomas de cambio con particular atención a las huellas y signos de alerta de oscilaciones en el comportamiento y distribución de organismos y ecosistemas, la consideración de contingencias sociopolíticas o derivadas de avances tecnológicos (tabla 10.1).

En cualquier caso, satisface constatar que el esfuerzo de la comunidad científica española en el ámbito del cambio global ha aumentando notablemente (figura 10.3) durante los últimos quince años, multiplicando por diez su esfuerzo de investigación durante esta época. El esfuerzo de investigación global es muy superior, de forma que se producen, anualmente, más de 20.000 artículos científicos relevantes al cambio global a nivel mundial. Progresivamente estos esfuerzos se van articulando a nivel internacional. A finales de los años 90 se creó el Programa Internacional de la Geosfera y Biosfera (IGBP) con el fin de mejorar, a partir de programas temáticos centrados en el

Disciplina	Aportación
Paleociencias	Reconstrucción de climas y biosferas pasadas que permitan comprobar la fiabilidad de modelos climáticos desarrollados para predecir climas futuros
Física de la Atmósfera	Modelos climáticos, predicción climática, modelización de eventos extremos (ciclones, etc.)
Oceanografía	Papel del océano y su biota en la regulación climática y del funcionamiento del sistema Tierra. Aumento del nivel del mar
Ecología	Huellas del cambio global en los organismos, las poblaciones y los ecosistemas, posibles extinciones, consecuencias para el funcionamiento de la Biosfera y los servicios que ésta presta a la sociedad
Ciencias de la Tierra	Dinámica de la hidrosfera, atmósfera y criosfera, intercambios de materiales y respuesta al cambio global; dinámica de la línea de costa en respuesta al cambio global
Biología molecular	Consecuencias del cambio global sobre la expresión génica; papel de la diversidad genética sobre la adaptación al cambio global
Biogeoquímica	Regulación del ciclo de elementos activos en la regulación climática y elementos biogénicos, acidificación del océano
Química	Química atmosférica, flujos de contaminantes orgánicos persistentes
Hidrología	Impactos del cambio global sobre la hidrosfera y el ciclo de agua. Dinámica de acuíferos
Historia	Reconstrucción de cambios en el uso de recursos por la humanidad, así como las consecuencias de cambios ambientales a escala regional sobre civilizaciones pasadas
Teoría de Sistemas Complejos	Comportamientos no lineales, comportamiento extensible y procesos caóticos en el sistema Tierra
Ciencias de la Salud	Impacto del cambio global sobre la salud humana (enfermedades emergentes, interacción entre agentes químicos y cambios ambientales, etc.)
Sociología	Impacto social del cambio global. Prospectivas sobre estilos de vida. Percepción pública del cambio global; mecanismos de consensos y gobernanza globales; organización social e institucional para la adaptación y resiliencia social. Migraciones
Economía	Impacto económico del cambio global
Computación y Matemáticas	Algoritmos eficientes en modelos de circulación global; propagación de incertidumbre en modelos; enlazado de modelos de distintas escalas

Tabla 10.1. Aportación de distintas disciplinas de la ciencia a la investigación del cambio global.

océano, ecosistemas terrestres, y atmósfera entre otros, nuestro conocimiento del funcionamiento del planeta (ver sección Enlaces). Más adelante surgen los programas

internacionales Diversitas, que aborda la investigación sobre diversidad biológica y su conservación a nivel global, y el programa IDHP centrado en la dimensión humana del cambio

global (ver enlaces). Poco a poco emerge un nuevo concepto, más integrador e interdisciplinar, del que surge el Consorcio para la Ciencia del Sistema Tierra (ESSP, ver enlaces), que incorpora, en un único foro en el Consejo Internacional para la Ciencia (ICSU), todos estos programas internacionales de investigación, que movilizan decenas de miles de investigadores en todo el mundo. Estos programas, considerados “*Big Science*” (ciencia grande) por sus presupuestos multimillonarios, juegan un papel clave, pero han de conjugarse con las aportaciones que pueden partir de ideas surgidas a nivel de investigador individual o grupo de investigación, evitando así convertirse en *lobbies* científicos que desincentiven, por su estructura jerárquica, donde comités integrados por unas docenas de investigadores dictan la agenda científica a seguir por los miles de participantes, y que tienden a auto-perpetuarse más allá de la consecución de sus objetivos.

En España, siguiendo al ESSP y ampliándolo, se ha creado el Comité Español de Investigación en Cambio Global, CEICAG (ver enlaces), con el objetivo de desarrollar esta comunidad epistémica.

A pesar de las incertidumbres en cuanto a la importancia de distintos motores del cambio global, las interacciones entre ellos y el alcance futuro del cambio global, existe un

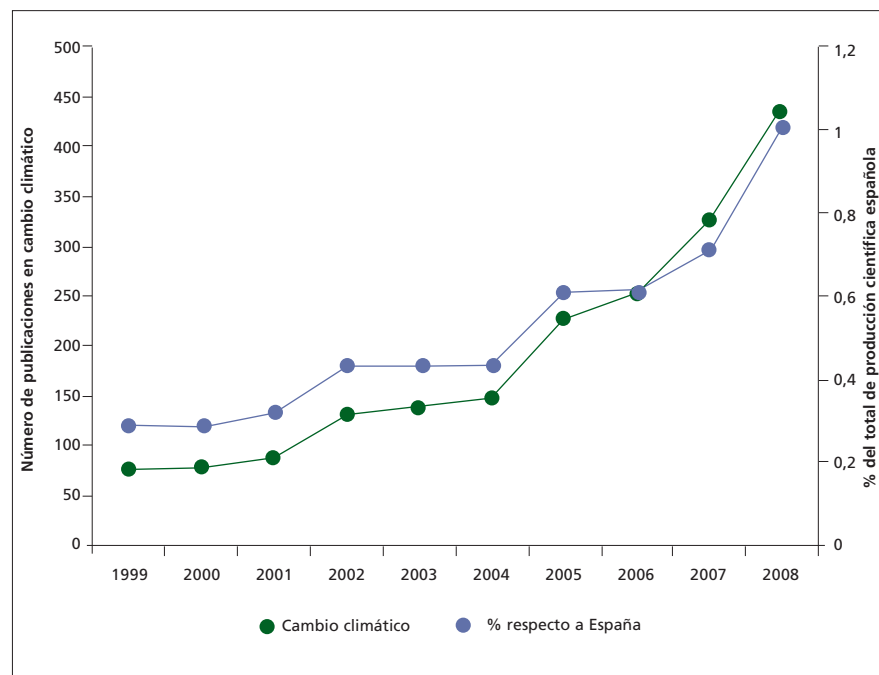


Figura 10.3. Aumento en el número de publicaciones científicas de investigadores de instituciones españolas sobre cambio climático.

Fuente: González-Abal et al. (2009).

amplísimo consenso en la comunidad científica en torno a la constatación del cambio climático, con una tendencia al calentamiento del planeta en el que la actividad humana juega un papel fundamental, así como el papel de la presión humana sobre la degradación de los ecosistemas, la pérdida de biodiversidad y de servicios ecosistémicos.

Como se ha indicado, este consenso se articula a partir del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, que es un foro que, a través

de la participación de cientos de investigadores de decenas de países, emite informes periódicos (cada cuatro años) que integran el conocimiento científico sobre la evolución del clima y sus causas (ver sección 7).

Este proceso permite el avance del consenso científico, pero es un avance lento, pues desde que una nueva idea o concepto se presenta a la comunidad científica hasta que éste se consolida pueden transcurrir varios años o, en casos extremos, décadas. Este retraso



Alcornos viejos en el Parque Nacional de Cabañeros (Ciudad Real).

Fotografía: F. Valladares.

en la incorporación de conocimiento científico en el proceso que eventualmente interviene en la toma de decisiones y los convenios internacionales supone un riesgo en un contexto en el que un retraso de diez años en adoptar decisiones acertadas puede restar capacidad adaptativa frente al cambio global. Es importante pues que la comunidad científica articule mecanismos más ágiles a partir de los cuales nuevos conocimientos científicos puedan contemplarse en escenarios plausibles del cambio global, antes incluso de que hayan pasado a formar parte del *corpus* de conocimiento científico consolidado.

Toda vez que el calentamiento global se perfila como el más importante de los problemas asociados al cambio global, están empezando a surgir propuestas para intentar reducir el problema mediante técnicas de geoingeniería, que implican la intervención humana para alterar el

balance térmico del planeta. Las propuestas incluyen desde el estímulo de la captación de CO₂ a través de la adición de hierro al océano y la siembra de sulfuro en la estratosfera a la puesta en órbita de lentes para desviar la radiación solar. Estas propuestas, inicialmente planteadas como tests de nuestro conocimiento sobre los procesos que controlan el clima se están comenzando a considerar seriamente, suscitando polémicas en el seno de la comunidad científica, parte de la cual considera estas propuestas como ejercicios de “aprendices de brujo” que pueden originar problemas imprevistos y que pueden ser utilizadas políticamente para detraer de los esfuerzos para disminuir la liberación de gases de efecto invernadero, que debiera acometerse sin mayor dilación.

Un reto adicional de la contribución científica al problema de cambio global es el de la difusión

eficiente del conocimiento científico a la sociedad, actividad en la que la comunidad científica muestra carencias intrínsecas que afectan a éste y otros ámbitos de la investigación. De hecho no sólo es necesario informar a la sociedad sobre los progresos científicos en la comprensión y predicción del problema del cambio global, sino que es necesario informar sobre la naturaleza misma de la ciencia, de forma que conceptos importantes, como el de incertidumbre en ciencia, se comprendan adecuadamente. En particular, el concepto de incertidumbre en ciencia se ha utilizado erróneamente, a veces por ignorancia y muchas de forma intencional para sembrar dudas en el ciudadano bajo el argumento de “que los científicos no se ponen de acuerdo”. La incertidumbre es consustancial a la ciencia moderna que, a diferencia de otros periodos de la historia, admite la discrepancia como motor de progresión. La certeza pertenece a otros ámbitos distintos de la actividad humana, como el

pensamiento religioso, pero desde luego no a la ciencia que se construye sobre la base de que todas las teorías y conocimiento actual son inciertas y, por tanto, susceptibles de mejora.

La forma en la que los investigadores abordan el problema de la diseminación a la sociedad es típicamente la de publicación de páginas web donde se dan a conocer los resultados de los proyectos de investigación. Sin embargo, la efectividad de este proceso es cuestionable debido a la saturación de información en Internet, donde en una búsqueda en agosto de 2006 (Google) aparecen 640 millones de páginas relacionadas con el cambio global. Muchas de las páginas que supuestamente ofrecen información científica, son publicadas por fuentes sin solvencia científica, de forma que el visitante que no es especialista se encuentra con multitud de opiniones y visiones muchas veces en conflicto unas con otras, generando confusión. Por otra parte la información ofrecida en muchas de ellas es genérica o específica a regiones que no atienden a los intereses particulares de los visitantes. La creación de observatorios del cambio global, como puntos focales puentes que permitan la integración de conocimiento científico y su divulgación a la sociedad junto con un compendio de hechos relevantes, puede ayudar a paliar esta deficiencia y asegurar la disponibilidad de un flujo

de información fiable, rigurosa, contrastada y relevante a la sociedad.

El amplio esfuerzo transdisciplinar necesario para la investigación del cambio global supone un desafío a la estructura actual de la investigación científica, compartimentalizada en pequeñas especialidades con escasa vinculación con otras especialidades próximas, no digamos ya con otras disciplinas, los mecanismos de comunicación científica, igualmente estructurados en *gethos* para especialistas inaccesibles a investigadores de otra especialidad, y la formación universitaria y de postgrado articulada en torno a departamentos y facultades de temática especializada.

El problema del cambio global pone al descubierto el agotamiento del modelo de crecimiento enciclopédico de la ciencia, que se ha ido articulando desde una concepción general “filosófica” inicial a una compartimentalización creciente del conocimiento en los últimos tres siglos. A lo largo de este proceso, la ciencia ha erigido pieza a pieza una nueva Torre de Babel del conocimiento, castigada —como en mito bíblico— con el castigo de la proliferación de lenguajes incompresibles que impiden la comunicación entre científicos de distintas disciplinas. De entre los millones de documentos científicos publicados anualmente, sólo una fracción mínima (< 0,1%) son

comprensibles a un investigador dado, que sólo consigue ojear —no ya leer— una de cada 10.000 publicaciones. Cabe dentro de lo posible que descubrimientos aparentemente intrascendentes en un campo lejano al de la investigación del cambio global pudiesen aportar soluciones clave para algunas de las tareas enunciadas. Sin embargo, la probabilidad de que estos hallazgos lleguen al conocimiento de los investigadores capaces de establecer su relevancia para el problema del cambio global es mínima. Es necesario, tanto para abordar con garantías de éxito el problema del cambio global como otros problemas que implican sistemas complejos, generar una nueva concepción de la ciencia que fomente la actividad transdisciplinar, elimine barreras a la comunicación y el flujo de conocimiento. Esto requiere de cambios fundamentales desde la estructura de la actividad científica hasta la redefinición de currículos universitarios, que estamos aún lejos de abordar.

Es necesario, además, articular centros o redes de investigación con suficiente masa crítica como para abordar el problema de cambio global desde sus distintas dimensiones. Existen aún pocos centros de investigación que hagan esto de forma eficiente, pues normalmente se especializan en alguno de estos componentes, como clima, atmósfera, océano o sociedad. En nuestro país, en particular, no existe

aún ningún centro de investigación que haga del cambio global su objetivo principal, destinando a este objetivo recursos, personal y transdisciplinariedad suficientes. Quizá sea más realista y efectivo en nuestro país, caracterizado en general por escasa masa crítica en ciencia, promover ejes de institutos y grupos de investigación que puedan articular su investigación con la masa crítica y dimensión transdisciplinar suficientes para abordar el cambio global que pretender agregar todas estas capacidades y las distintas infraestructuras que precisan bajo un mismo instituto. De hecho, existen excelentes investigadores en muchos de los ámbitos específicos del cambio global en nuestro país, pero actúan típicamente en pequeños grupos de dos a cinco investigadores. Articular estos grupos para crear masa crítica debiera ser pues objetivo prioritario de la política científica española.

La investigación científica, con su énfasis en el desarrollo de modelos capaces de generar predicciones, supone una plataforma privilegiada para la formulación de análisis prospectivos que apoyen actuaciones adaptativas. En el caso de nuestro país, este análisis permite identificar la sequía y la disminución de los recursos hídricos como la amenaza más importante, en la que las áreas excedentarias en agua desaparecerán, excepto por reductos de la cornisa cantábrica, de nuestra geografía. Los efectos de esta disminución de recursos

hídricos serán particularmente importantes en las zonas costeras mediterráneas, donde al incremento del déficit hídrico por motivos climáticos se ha de sumar el aumento de la demanda por el aumento de población transeúnte y, en menor medida, residente, y la salinización de acuíferos asociada al aumento del nivel del mar. Estas predicciones, que se derivan de forma consistente de los distintos modelos climáticos disponibles, deberían hacernos reflexionar e iluminar actuaciones encaminadas a lograr el ahorro de agua (e.g. aumento de la eficiencia de sistemas de irrigación, canalización y reciclado, implementación de tecnologías de ahorro en ámbitos doméstico e industrial, etc.), la recarga de acuíferos en los periodos húmedos que puedan darse entre sequías y la recuperación de ecosistemas que, como las zonas húmedas, contribuyen positivamente a la economía del agua. No parece lógico plantear, a la vista de estas predicciones, planes hidrológicos basados en transvases, que requieren como premisa *sine qua non* de la existencia de regiones excedentarias que puedan donar agua a las zonas deficitarias y que disminuirán de nuestra geografía.

Ampliando el horizonte de nuestra visión del futuro, es evidente que la sequía y la disminución de recursos hídricos serán aún más agudas en las riberas sur y este de la cuenca mediterránea. Si esta predicción se

conjuga con las elevadas tasas de crecimiento de algunos países de esa región, notablemente Egipto, y la debilidad de las economías de los países de esta región para adaptarse a estos desafíos, la lectura inevitable es la posibilidad de un importante aumento de los flujos migratorios hacia Europa y la proliferación de conflictos e inestabilidad en la región. Es evidente que, en un mundo globalizado, las actuaciones para mitigar los impactos del cambio global no pueden circunscribirse a nuestras fronteras. Los efectos en unas regiones tienen consecuencias sobre otras, generando posibles efectos dominó que sólo pueden anticiparse desde la actividad investigadora, conjugando las capacidades de ciencias naturales con las de las ciencias sociales.

10.3. El papel de las tecnologías

Todas las sociedades, desde la de cazadores-recolectores a la industrializada, han impactado el medio ambiente biogeofísico generalmente hasta donde su desarrollo tecnológico lo ha permitido. Aun con algunas excepciones, ésta es una ley histórica general (Crosby & Worster, 1986).

En el caso de las sociedades económicamente desarrolladas actuales, el desarrollo científico-tecnológico ha

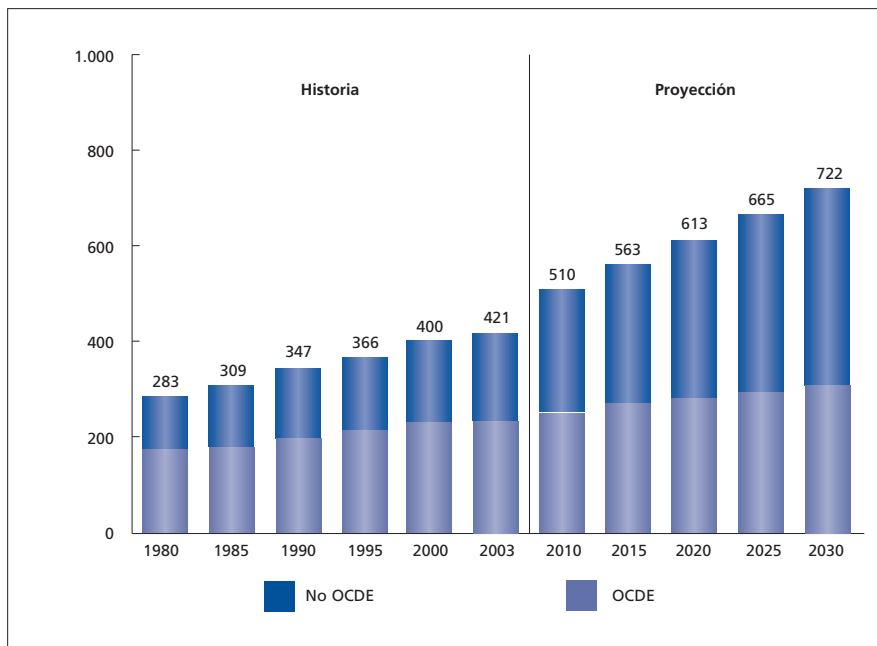


Figura 10.4. Evolución del consumo energético de mercado en países desarrollados (OCDE) y en desarrollo (no OCDE) entre 1980 y 2030. Datos en equivalentes térmicos de 10^{15} unidades térmicas británicas.

Fuentes: Administración de la Información de Energía (EIA, www.eia.doe.gov/iea) y EIA (2006).

alcanzado un nivel sin precedentes, por lo que tiene un protagonismo central en la producción del cambio global, pero también en su mitigación y adaptación. Concretamente, la tecnología de la energía basada en la combustión de fósiles, y su creciente uso, y las tecnologías químicas se encuentran entre las principales causas antrópicas del cambio global, y, por ello, son una de las principales áreas a transformar.

El uso de energía sigue creciendo en una espiral imparable, y aunque la

producción y uso de las energías renovables está aumentando, su contribución porcentual es todavía escasa: el 8% (EIA 2007), aunque la Unión Europea se ha planteado el objetivo de 20% de producción de energía primaria por renovables para el año 2020, mientras que la energía nuclear parece anclada en torno al 6% del consumo total. Así pues, el consumo total de combustibles fósiles seguirá creciendo (figura 10.4). Se predice que sin la implantación de



Parque eólico cerca de Tarifa en pleno Parque Natural de Los Alcornocales, en una zona de elevada biodiversidad y riqueza de endemismos, con el mar Mediterráneo al fondo.

Fotografía: F. Valladares.

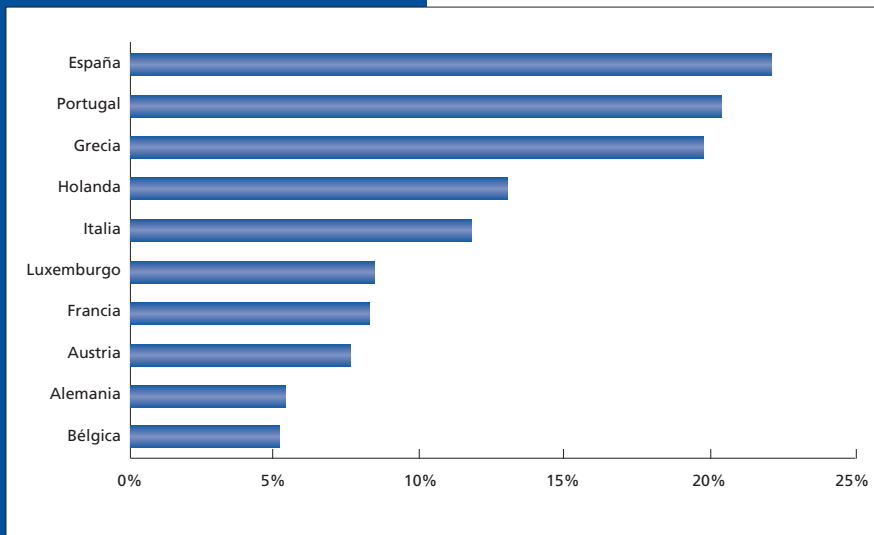


Figura 10.5. Incremento de la demanda de energía eléctrica, países de la UCTE (Unión para la Coordinación de la Trasmisión de Energía), 1999-2003.

Fuente: Red Eléctrica Española, 2004.

medidas de ahorro contundentes, el consumo de energía aumentará en un 71% entre 2003 y 2030, creciendo a un ritmo cercano al 2% anual (figura 10.5). Sin embargo, el crecimiento es mayor en Asia, con un 3,7% anual, un 2,8% anual en América Central y Sudamérica, un 2,6% anual en África, y un 2,4% anual en Oriente Medio. Este crecimiento es particularmente abrupto en nuestro país (figura 10.5).

El automóvil es un ejemplo de tecnología que produce un importante impacto ambiental (emisión de gases), aunque también permite la adaptación (motores más eficientes que consumen y emiten

menos). Su eficiencia, sin embargo, queda contrarrestada por el gran aumento de la flota automovilista, lo cual lleva a que las políticas de disminución del impacto se dirijan no sólo a las mejoras tecnológicas, sino también al cambio social en el uso del vehículo (mayor uso del transporte colectivo), aunque todavía se está lejos de políticas y comportamientos realmente eficaces al respecto. Así, el parque de vehículos sigue creciendo de forma notable (figura 10.6).

Año	Parque vehículos
1980	10.192.748
1985	11.716.339
1990	15.696.715
1995	18.847.245
1996	19.542.104
1997	20.286.408
1998	21.306.493
1999	22.411.194
2000	23.284.215
2001	24.249.871
2002	25.065.732
2003	25.169.452
2004	26.432.641
2005	27.700.000
2008	31.000.000

Figura 10.6. Cifras del parque automovilístico.

Nota: Los datos de 2005 son estimados.

Fuente: Dirección General de Tráfico, 2005.

	Producción en términos de energía primaria (ktep)			
	2004 (1)	2010		
		Escenarios de energías renovables		
		Actual	Probable	Optimista
Total áreas eléctricas	5.973	7.846	13.574	17.816
Total áreas térmicas	3.538	3.676	4.445	5.502
Total biocarburantes	228	528	2.200	2.528
Total energías renovables	9.739	12.050	20.220	25.846
Escenario energético: tendencial				
Consumo de energía primaria (ktep)	141.567	166.900	167.100	167.350
Energías renovables / energía primaria (%)	6,9%	7,2%	12,1%	15,4%
Escenario energético: eficiencia				
Consumo de energía primaria (ktep)	141.567	159.807	160.007	160.257
Energía renovables / energía primaria (%)	6,9%	7,5%	12,6%	16,1%

Figura 10.7. Plan de Energías Renovables, España.

Fuente: IDAE.

(1) Datos provisionales. Para energía hidráulica, eólica, solar fotovoltaica y solar térmica, se incluye la producción correspondiente a un año y medio, a partir de las potencias y superficie en servicio a 31 de diciembre, de acuerdo con las características de las instalaciones puestas en marcha hasta la fecha, y no el dato real de 2004. No incluidos biogás térmico y geotermia, que en 2004 representan 26 y 8 ktep.

El desarrollo de energías limpias que no produzcan gases de efecto invernadero (el caso de los combustibles fósiles) es uno de los primeros retos respecto al cambio global. Concretamente, el desarrollo masivo de energías renovables, y en particular la energía solar, eólica y maremotriz¹, junto a la cogeneración, es una de las respuestas centrales al problema del cambio climático. Complementario, y muy importante, es el desarrollo de políticas de ahorro y eficiencia energética, pues, con independencia del

tipo de energía, se requiere llevar a cabo una gestión para minimizar la creciente demanda energética. El lento —aunque firme— desarrollo de estas energías no es tanto un problema tecnológico como social, en el sentido de las barreras sociopolíticas que todavía existen para el necesario avance.

Existen fuentes de energía aún por explotar, entre las que destacan la energía del oleaje (figura 10.8) y las mareas, que en la Península Ibérica no juegan todavía un papel importante, en otros países como Francia, Países Bajos

1. El potencial de Galicia en energía marina es “comparable a un gran pozo de petróleo”, según el experto Tony Lewis, de University College Cork (Faro de Vigo, 28/19/2005).



Figura 9.8. Niveles de energía de ola (kW/m).

Fuente: Iberdrola.

o EE.UU., sin embargo, se está utilizando esta tecnología con éxito desde los años 1960.

La desalación se utiliza de manera creciente por sus ventajas relativas frente al uso alternativo de otras fuentes de recursos. La desalación de agua marina tiene un enorme potencial de combinarse con el uso de energía marina y resolverse el problema de disolución de las salmueras que genera. De hecho, John F. Kennedy dijo hace más de 40 años: “Si fuese posible obtener a un coste modesto agua dulce de agua del mar, este logro serviría los intereses de la humanidad a largo plazo de tal manera que empujaría cualquier otro logro de la ciencia”. Este logro se encuentra ya cercano: algunas capitales españolas abastecen a su población mayoritariamente mediante agua desalada (Palma de Mallorca, Alicante). La Comunidad de Regantes de Mazarrón (Murcia) tiene una en funcionamiento desde noviembre de 1995, que les aporta 4.500 m³/hora para regar 3.600 hectáreas. Los 1.800 agricultores de la Comunidad de Regantes de Cueva de la Almazora en Palomares (Almería) riegan 5.500 hectáreas con los 25.000 m³ que les asegura la planta de desalación de los acuíferos de la zona. La eficiencia energética de la desalación ha mejorado

de manera muy importante en los últimos años, lo que ha permitido una gran disminución en el coste por m³.

En España hay unas 700 plantas desalinizadoras, y el país se orienta a constituirse como líder en el uso de esta tecnología, contando con algunas empresas líderes en este sector en el ámbito internacional, aunque la ubicación de algunas de estas plantas ha suscitado fuerte oposición social².

Es más que posible que algunas tecnologías que pueden resultar clave en el futuro para reducir las emisiones de gases invernadero sean hoy en día impensables y se originen de desarrollos relativamente inesperados. De hecho, la historia de la ciencia está plagada de ejemplos de desarrollos científicos sin aparente utilidad práctica para sus descubridores (como el ADN), algunos de los cuales han dado pie a enormes desarrollos tecnológicos (biotecnología). Por otro lado, es igualmente posible que grandes esfuerzos y enormes inversiones para el desarrollo de alguna tecnología prometedoras, como la fusión nuclear, no aporten los réditos esperados.

La capacidad de las sociedades para desarrollar a la velocidad necesaria las tecnologías de mitigación y adaptación al cambio global es un asunto clave. La tecnología no es una esfera

independiente de la sociedad, sino grandemente dependiente de los contextos sociales (MacKenzie y Wajcman, 1998), por lo que se requieren cambios y esfuerzos por parte de las diversas instituciones y agentes sociales (gobiernos, empresas, organizaciones sindicales, organizaciones sociales en general) para superar las barreras (desconocimiento, rutinas, descoordinación, intereses particulares espurios, financiación...) y, por el contrario, aprovechar las oportunidades que el cambio global abre a un desarrollo tecnológico limpio y socialmente justo.

10.4. El papel de la política

Los importantes cambios sociales necesarios para abordar la mitigación y adaptación al cambio global³ hacen más relevante, si cabe, el papel protagonista de la esfera de la política, y particularmente de las políticas públicas. El “mercado” (o la competitividad económica) no puede resolver por sí mismo estos graves problemas, ni en general la protección del medio ambiente como bien común que es. De hecho, el mercado forma parte del problema —al basarse sobre todo en el beneficio pecuniario y el

2. Por ejemplo, los conflictos en torno a la planta desaladora que se está construyendo en la margen izquierda de la Rambla de Valdelentisco, entre Mazarrón y Cartagena (Murcia).

3. Véase los informes de referencia del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC).

corto plazo— y, precisamente por ello, también ha de ser una parte importante de la solución. El cambio global requiere potenciar fuertemente las políticas públicas de mitigación y adaptación en los ámbitos internacionales y nacionales, pero también en los autonómicos y locales. Conviene aclarar que las políticas públicas no se refieren sólo a la legislación —aunque ésta es la base imprescindible⁴— sino que son estrategias y líneas de acción determinadas por el interés común, dirigidas a guiar, articular y promover las acciones de los diversos actores, como son: el Estado, las empresas privadas y las organizaciones civiles, en este caso en el ámbito del cambio global. Las políticas públicas se desarrollan a través de instrumentos diversos: legislativos, económicos, fiscales y sociales, pero lo importante (y complejo) es que todos esos instrumentos trabajen de forma coordinada con el objetivo común de la minimización del cambio global. El relevante papel de la política se pone de manifiesto, por ejemplo, en Alemania en relación a la reducción de emisiones y el consumo de energía: las emisiones de gases de efecto invernadero se han reducido en un 19% durante el periodo 1990-2005 (EEA, 2005). Esta

tendencia se debe —además del cambio en los combustibles utilizados— a las nuevas políticas y medidas como resultado de los tratados internacionales, y por desacoplar el crecimiento económico del consumo energético. Los cambios en el consumo ciudadano y la implementación de eco-tasas⁵ también han tenido una influencia en esa disminución.

La tabla 10.2 sintetiza algunos de los instrumentos políticos más importantes que se han desarrollado hasta el momento con relación a la mitigación y adaptación al cambio global, con resultados diversos. Cabe destacar que las políticas de mitigación, por su propia naturaleza, no son al cien por cien eficaces y que, además, el cambio global lleva ya un largo recorrido y contiene inercias que obligan a actuar también sobre los efectos. Es decir, se requiere políticas de mitigación pero también de adaptación, entendidas como aquellas orientadas a paliar el impacto del cambio global, o al menos a no magnificarlo.

Las herramientas políticas para abordar el cambio global deben buscar, claramente, el concierto más amplio en el conjunto de las naciones. Probablemente los tres convenios de ámbito global más importantes para afrontar el problema del cambio global son los siguientes:

- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC; www.unfccc.int/Portal_Espanol/Items/3093.php). Conocida popularmente como el Protocolo de Kioto, en la Convención se fija el objetivo último de estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero “a un nivel que impida interferencias antrópicas peligrosas en el sistema climático”. Se declara asimismo que “ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible”. La convención ha entrado ya en vigor, pero existe todavía un contingente importante de países, entre ellos el que más emisiones genera, EE.UU., que no la han ratificado. De momento siguen las negociaciones para determinar las obligaciones de los Estados después de 2012, el así llamado proceso post-Kioto. Un hecho esperanzador es que en la cumbre G8 en Japón en 2008, los estados industriales más desarrollados, incluyendo los EE.UU. se han comprometido de reducir sus emisiones de CO₂ al 50% hasta 2050.

4. La perspectiva desreguladora minimiza la importancia de la esfera legislativa y normativa formal. Para profundizar en esta perspectiva, véase: Kahn, Alfred E. (1988).

5. Las ecotasas para disminuir el impacto ambiental deben cuidar el no producir mayor desigualdad social.

Tema	Nivel	Tratados		
Agua	Europeo	Directiva Marco de Aguas (2000/60/CE)		
	Nacional	Plan Hidrológico Nacional (Ley 11/2005) Programa A.G.U.A. (2004-2008) Libro Blanco del Agua		
Conservación	Internacional	Convenio RAMSAR: Humedales de Importancia Internacional Convenio CITES: Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora silvestre Convenio de Bonn: Conservación de las Especies Migratorias de Vida Silvestre		
		Europeo	Convenio de Berna: Conservación de la Vida Silvestre y del Medio Natural en Europa Estrategia Forestal Europea Directiva 79/409/CEE para la conservación de las aves Directiva 92/43/CEE relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres Directiva 90/219 sobre uso confinado de Organismos Transgénicos Directiva 90/220 sobre liberación intencionada de Organismos Transgénicos en el medio ambiente Convenio sobre el Paisaje	
			Nacional	Estrategia Forestal Española Plan Forestal Español (2002-2032) Estrategia Española para la Conservación y Uso sostenible de la Diversidad de los Ecosistemas Estrategia de Conservación de Especies Amenazadas Plan Estratégico para la Conservación y Uso Racional de los Humedales
	Internacional			Protocolo de Montreal: relativo a las sustancias que agotan la capa de Ozono
				Nacional
	Cambio climático		Internacional	Protocolo de Kioto
			Nacional	Plan Nacional de Asignación Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático Ley de Costas
	Costas		Nacional	Ley de Costas
	Desertificación	Internacional	Convenio de Lucha contra la Desertificación	
		Nacional	Programa de Acción Nacional contra la Desertificación	
	Diversidad biológica	Internacional	Convenio sobre la Diversidad Biológica	
	Energía	Europeo	Directiva 2001/77/CE, relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de la electricidad Directiva 2004/8/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa al fomento de la cogeneración Directiva Comunitaria de Eficiencia Energética de Edificios ORDEN PRE/472/2004, creación Comisión Inter-ministerial para aprovechamiento energético biomasa	
			Nacional	Plan de Energías Renovables (2005-2010) Estrategia Española Eficiencia Energética (2004-2012) Plan Renove Electrodomésticos, Plan de Equipamiento y Uso eficiente de la Energía en la Administración Pública Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética (2005-2007) Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)
Internacional				Convenio de Barcelona / Plan de Acción del Mediterráneo. Convenio para la protección del medio ambiente marino del Atlántico del nordeste (OSPAR) Convenio sobre la prevención de la contaminación del mar por vertimiento de desechos y otras materias (Convenio de Londres)
				Nacional
Educación Ambiental General		Europeo	Estrategia Europea de Desarrollo Sostenible	
		Nacional	Estrategia Española de Desarrollo Sostenible (pendiente aprobación)	
Residuos		Nacional	Plan Nacional de Residuos (2000-2006)	

- El Convenio sobre la Diversidad Biológica (cbd; www.biodiv.org)
Los objetivos del presente convenio, que se han de perseguir de conformidad con sus disposiciones pertinentes, son la conservación de la diversidad biológica, la utilización sostenible de sus componentes y la participación justa y equitativa en los beneficios que se deriven de la utilización de los recursos genéticos.
- Convención de las Naciones Unidas para Combatir la desertificación (UNCCD; www.unccd.int)
El objetivo de esta convención es combatir la desertificación y mitigar los efectos de las sequías en países que sufren sequías severas y/o desertificación, particularmente en África.

Mientras que es importante alcanzar convenios globales, también es necesario desarrollar políticas regionales, nacionales y locales, ya que la problemática causal y de impactos del cambio global varía a todas estas escalas.

Las convenciones y herramientas indicadas anteriormente obligan generalmente a los Estados, pero sólo en contados casos las responsabilidades se trasladan a los actores privados y ciudadanos, lo que les resta efectividad.

De hecho, sólo la modificación de conductas individuales puede en último

Tabla 10.2. Algunos de los instrumentos básicos para abordar el cambio global.

término curvar la progresión de la presión humana sobre el planeta que es, en grado último, el sumatorio de las actividades individuales y las derivadas de sus prácticas de consumo. Mientras que en aspectos relacionados con la salud pública, como el caso del tabaco, se ha regulado con éxito el comportamiento individual, parece lógico pensar que el consumo excesivo de recursos pueda ser sujeto de una regulación normativa similar. De hecho, las tarifas de consumo de agua son habitualmente progresivas, donde el coste por m³ aumenta progresivamente por tramos de consumo. El consumo de energía, que conlleva la emisión de gases de efecto invernadero, también se ha regulado en España recientemente en esa línea, beneficiando a los pequeños (de hecho muy pequeños: 3 kw) consumidores. En nuestro país la reciente legislación que obliga a la instalación de placas solares de energía térmica en nuevas viviendas es un paso adelante en la regulación normativa de medidas encaminadas a mitigar el problema del cambio global. La aceptación social de medidas normativas que afectan las pautas de consumo requieren, sin embargo, un amplio consenso sobre la importancia de afrontar estos problemas, lo que a su vez requiere un nivel de conocimiento que quizá no se ha alcanzado aún en algunas sociedades como la nuestra, donde las ecotasas encuentran aún

considerable resistencia. Esta resistencia requiere también de políticas encaminadas a educar y concienciar a la sociedad. Algunas administraciones, notablemente la Administración actual de EE.UU., parecen fiarlo todo a la capacidad de la tecnología para encontrar soluciones. Sin embargo, la discusión precedente (sección 10.3) indica claramente que ésta es una vía arriesgada, pues no existen garantías de que las tecnologías, incluso si se presentan como muy prometedoras, como, por ejemplo, la fusión nuclear, generen los resultados esperados en un plazo de tiempo aceptable. La formulación de políticas requiere, en muchas ocasiones, del asesoramiento científico. Uno de los problemas con los que se enfrenta el legislador es, en ese caso, la selección de asesores científicos, lo que requiere de criterios claros de fiabilidad. El desastre del *Prestige* (España), o del *Exxon Valdez* (Estados Unidos), entre otros muchos ejemplos, puso de manifiesto cómo en una situación de crisis, como se pueden dar en el contexto del cambio global (extinciones de especies, desastres naturales, mortalidad asociada a olas de calor, sequías, riadas, etc.), emergen legiones de “expertos” cuyas opiniones son frecuentemente divergentes, lo que genera confusión. Es esencial, por tanto, que los legisladores y responsables políticos adquieran criterios de fiabilidad en relación a la

ciencia y los científicos. Esto requiere del uso de múltiples criterios, que pasan por la puesta en marcha de comités de asesoramiento, compuestos por investigadores cuya excelencia se sustancie en indicadores objetivos, pertenecientes a organismos e instituciones solventes y que no se encuentren contaminados por compromisos o intereses de las partes. Las dificultades en la selección de expertos solventes no son exclusivas de nuestro país. Baste considerar que el escritor de *best sellers* y médico de formación, Michael Crichton, prestó testimonio en el Comité de Medio Ambiente del Senado de EE.UU. como experto científico en cambio climático con el único mérito de ser autor del libro *Estado de Miedo*, plagado de errores y que presenta el problema del cambio climático como una confabulación de grupos ecoterroristas en connivencia con científicos.

Además de políticas normativas ejecutadas por la vía de sanciones e impuestos, los presupuestos públicos y la inversión del mercado pueden ser herramientas importantes también en la mitigación del cambio global. En España el mercado medioambiental ha crecido de manera significativa en los últimos diez años. Si se incluye el gasto e inversión de todos los sectores medioambientales tradicionales (agua, residuos, energías renovables y atmósfera) junto a los nuevos sectores



Desierto y fuerte erosión en los alrededores del Mar Muerto, con Israel al fondo.

Fotografía: F. Valladares.

emergentes (el forestal, la agricultura biológica y el turismo rural) se superarían los 12.000 millones de euros al año. A nivel mundial, la cifra actual del mercado medioambiental ronda los 330.000 millones de euros, y la previsión de crecimiento para el 2010 se sitúa en un 30%. Durante los últimos quince años, la mayoría del mercado medioambiental ha registrado crecimientos superiores al incremento industrial o al de la economía en general, y la tendencia observada en diversos países europeos indica que continuará este aumento durante los próximos cinco años, para después estabilizarse. El cambio global, y en particular el cambio climático, ha actuado de catalizador de este empuje

económico del mercado medioambiental.

Por su parte, las empresas de energías renovables podrían emplear hasta 270.000 trabajadores en 2020, el triple del actual número de puestos de trabajo directos que proporciona este sector, que alcanza los 89.000 trabajadores, según el estudio Energías Renovables y Generación de Empleo en España, realizado por el Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud de Comisiones Obreras.

En total, son ya más de 300.000 personas las que trabajan en España en el sector del medio ambiente, de las cuales casi una cuarta parte se encuentran en el sector público. A nivel europeo, el mercado medioambiental emplea globalmente al 2,3% de la población ocupada, lo que supone más de 3,5 millones de trabajadores en este sector. Además, cerca de un 87% de empresas españolas destina hoy en día un presupuesto a gastos derivados de la gestión medioambiental, fundamentalmente destinados a gestión de residuos, tratamiento y gestión de aguas residuales, emisiones atmosféricas y formación de empleados. No obstante, aunque existe la tendencia hacia un mayor peso del medio ambiente en el gasto público y en la inversión privada, los datos actuales revelan que su prioridad aún es baja. De hecho, los presupuestos generales del Estado del Ministerio de Economía y Hacienda no

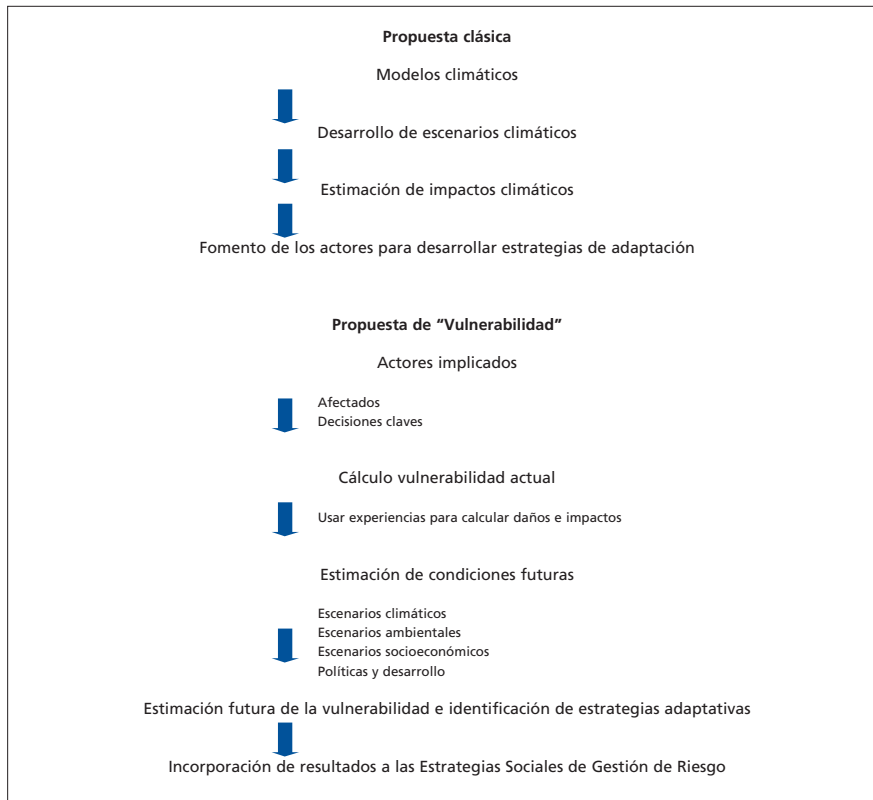


Figura 10.9. Enfoques investigadores y políticos diferentes.

contemplan incrementos relevantes en las partidas incluidas en apartados medioambientales.

Por último, se requiere avanzar en la horizontalidad. La problemática del cambio global requiere integrar la cuestión medioambiental en los análisis y decisiones económicas en todos los sectores económicos y a todos los niveles, así como involucrar a la sociedad civil en

su solución (concienciación, información, participación social). La figura 10.9 ilustra las diferencias de enfoques.

Los nuevos enfoques sobre políticas públicas conciben el gobierno como la gobernanza (CE 2001), es decir, como la toma de decisiones basada en la apertura y transparencia, en la amplia participación de los diversos agentes sociales, en la corresponsabilidad, en la

eficacia y en la coherencia, integrando la protección del medio ambiente con el resto de las políticas. El nuevo enfoque de gobernanza responde no sólo a la concepción democrática de la sociedad, sino también a razones de eficacia y eficiencia en la resolución de los graves problemas del cambio global, que requieren la participación activa del conjunto de la sociedad. De hecho uno de los objetivos más importantes de las políticas en relación con el cambio global ha de ser buscar la implicación activa de los ciudadanos. La participación social en la formulación de políticas frente al cambio global se ha canalizado en buena medida a partir de organizaciones no gubernamentales vinculadas al movimiento ecologista, que participan en mesas del Ministerio de Medio Ambiente, Patronatos de Parques Nacionales y, a nivel internacional, en las convenciones internacionales que se ocupan del problema de cambio global. Todas ellas se muestran muy activas en el ámbito del problema del cambio global, donde realizan una importante labor de sensibilización de la sociedad, propuestas de políticas avanzadas y actitudes individuales para afrontar el problema de cambio global. Sus propuestas van principalmente encaminadas a la mitigación, aunque no tanto a la adaptación, del cambio global.

La aplicación de políticas al cambio global ha abierto además nuevos debates que requieren de nuevos

conceptos y *corpus* jurídicos, como es el de los derechos de las generaciones futuras, que plantean retos aún por resolver al Estado de derecho.

10.5. El papel de la educación y la sensibilización ambiental

La importante aunque todavía insuficiente conciencia ambiental frente al cambio global pone de manifiesto que además de los retos económicos y tecnológicos existen otras barreras que dificultan o incluso impiden el cambio de la percepción del problema y la puesta en práctica de actitudes individuales y colectivas responsables. Existen evidencias claras de un escaso conocimiento e ideas erróneas en torno al cambio global en general y al climático en particular y, lo que es más grave, sobre la estrecha relación que existe entre el bienestar humano y la conservación de los ecosistemas. La concienciación ambiental no requiere necesariamente que se genere más información en una sociedad donde a través de Internet la información está globalizada. De hecho la información puede llegar a ser abrumadora y si no se sabe divulgar será difícil que los individuos sean capaces de entender y, lo que es más importante, internalizar la dimensión del problema y generar un cambio en su patrón de consumo. El Programa de Naciones Unidas de

Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, consciente de este problema, no lo aborda generando más información sino con la integración de la información en forma de visiones positivas sobre a dónde vamos en las relaciones entre los humanos y los ecosistemas. Por esta razón, elabora una serie de escenarios creíbles alternativos al modelo de desarrollo actual, en donde se exponen variables fundamentales y puntos de bifurcación que promueven actitudes de cambio. Bajo estos escenarios, los problemas y las crisis son percibidos como oportunidades para generar cambios hacia un mundo actual y futuro mejores. Las generaciones actuales tenemos en nuestra mano decisiones que afectan a las condiciones de vida de las generaciones futuras.

Es evidente que las nuevas políticas del cambio global deben promover procesos educativos y participativos que incrementen la percepción social de la interrelación insustituible entre los servicios de los ecosistemas y el bienestar humano. Esta acción debería facilitar el diseño e implementación de modelos de desarrollo que mejoren la resiliencia de los sistemas socioecológicos, reconociendo la existencia de umbrales de cambio, incertidumbres y sorpresas.

La educación y la sensibilización en materia de medio ambiente son imprescindibles para mitigar y adaptarse

al cambio global. En la última década se ha progresado mucho en el campo de la protección medioambiental. Sin embargo, aunque las poblaciones de las sociedades contemporáneas han alcanzado unos niveles relevantes de concienciación sobre los temas medioambientales, hay todavía que avanzar en crear las condiciones objetivas para que esa concienciación se traduzca plenamente en una participación social en los cambios sociales de comportamiento necesarios para abordar los graves problemas del cambio global. La educación medioambiental, dirigida tanto a los adultos como a los escolares, podría ayudar a estrechar la brecha y a mejorar las condiciones necesarias para alcanzar la sostenibilidad. Varias rutas inexploradas de educación medioambiental, situadas en la intersección entre la información, la educación, la tecnología y la ciencia, podrían ofrecer alternativas que también pueden y deben ser capaces de alcanzar a los adultos.

En la Enseñanza Primaria en España los contenidos de educación ambiental se abordan dentro de la materia de Conocimiento del medio, y en la Enseñanza Secundaria Obligatoria (ESO), que cursan los estudiantes entre 12 y 16 años, los contenidos de educación ambiental se incluyen en las áreas de Ciencias de la Naturaleza, Ciencias de la Tierra y del Medio

Mosaico de cultivos de cereal de secano con matorral mediterráneo y sabinas en una zona de notable abandono rural en el Parque Natural del Alto Tajo.

Fotografía: F. Valladares.



Ambiente, y Ciencias Sociales y Tecnología. En los seis primeros años de la Enseñanza Primaria no aparecen temas relacionados con el cambio global. En los últimos cursos de la Enseñanza Primaria y en los dos ciclos de la ESO ya sí se incluyen temas directamente relacionados con el cambio global, destacando el efecto invernadero, la influencia del ser humano en el clima, la deforestación, la capa de ozono, la lluvia ácida, la desertificación y los riesgos climáticos.

Los contenidos se vinculan con los siguientes objetivos: a) conocer la realidad del ambiente; b) desarrollar la sensibilidad e interés por el ambiente y c) fomentar la adquisición de hábitos y conductas de respeto, conservación y mejora del ambiente. Algunas actividades en relación con la educación ambiental incluyen, por ejemplo, recogida selectiva de papel y pilas, ahorro de agua y energía, huerto escolar, ecoauditorías, visitas a centros de interpretación, etc.

En el ámbito universitario, los temas en relación con el cambio global están

incluidos en las carreras de Físicas, Químicas, Biológicas, Geológicas, Geografía, Ciencias Ambientales y Sociología, así como en otras relacionadas con la educación, como son: Magisterio y Pedagogía. Representantes de profesores de Primaria, Secundaria y universidad de ámbitos tanto públicos como privados manifestaron un cierto grado de escepticismo respecto al estado actual y a la evolución de la educación ambiental (extraído de la Estrategia Navarra de Educación Ambiental).

Sin embargo, la educación y la sensibilización ambiental no se dirigen exclusivamente hacia el sector educativo formal sino al conjunto de la sociedad (ciudadanos, instituciones políticas, empresas, organizaciones políticas y sociales...). Se trata de actividades dirigidas a la concienciación,

negociación y capacitación para la acción ambiental de las instituciones y las personas para el cambio de creencias, normas, valores y comportamientos para la mitigación y adaptación al cambio global, y se articula en torno a tres instrumentos que considera el *Libro Blanco de Educación Ambiental en España*:

- Información. Ley 27/2006, de 18 de julio, por la que se regulan los derechos de acceso a la información, de participación pública y de acceso a la justicia en materia de medio ambiente (incorpora las Directivas 2003/4/CE y 2003/35/CE).
- Formación y capacitación ambiental.
- Participación social.

La participación de la sociedad es la clave para obtener los cambios que se



El luminoso sotobosque del quejigar es muy rico en especies de flora y fauna, algunas como las peonias del primer plano de gran valor naturalístico y estético.

Fotografía: F. Valladares.

necesitan, y para ello es preciso incrementar la sensibilidad ante la degradación medioambiental. Sólo a través de la participación se puede conseguir la cohesión social necesaria para resolver los complicados problemas a los que se enfrentan las sociedades actuales ante el cambio global. Es importante promover la interrelación entre educación medioambiental y participación ciudadana en decisiones concernientes al medio ambiente. La voluntad de los ciudadanos de involucrarse en procesos públicos de decisión depende del grado en que se sientan afectados personalmente por el

tema, así como de su sentido individual de “competencia subjetiva” (Fiorino, 1990). Con toda probabilidad, ambos criterios pueden fácilmente ser influenciados por la educación medioambiental. Simultáneamente, la creciente participación ciudadana puede ser vista como una valiosa contribución a la educación medioambiental así como una contribución a la búsqueda de un desarrollo de las sociedades que sea medioambientalmente sostenible.

Además de varias actividades nacionales dentro de los países miembros europeos, la Unión Europea/Comunidad Europea, el Consejo de Europa, el Centro de Investigación e Innovación Educativa de la OCDE (CERI) y la UNESCO desarrollan programas de educación medioambiental. Organizaciones internacionales sin fines de lucro también están iniciando y llevando a cabo programas y estableciendo redes internacionales para ayudar a las instituciones antes mencionadas. Un ejemplo de esto es la Fundación para la Educación Medioambiental en Europa (FEEE), fundada en 1981, que desarrolla programas para jóvenes y escolares (por ejemplo: la iniciativa “European Eco-Schools” y el programa “Young Reporters of the Environment”), así como programas destinados a los adultos, tales como “European Blue Flag”, programa sobre playas y puertos deportivos.

Puesto que la educación medioambiental está en la actualidad

dirigida a las escuelas —lo que significa que es aplicable principalmente a jóvenes y niños— son precisas más acciones destinadas a los adultos. Si bien hay consenso en que la educación medioambiental no se limita al grupo de los jóvenes, en general las actividades en el campo de la educación de adultos en temas medioambientales no están siendo desarrolladas en suficiente profundidad. Éstas podrían, por ejemplo, consistir en medidas que alentasen la formación profesional continua y holística en apoyo y como suplemento de esfuerzos en curso; se podrían desarrollar o adaptar para su uso en educación medioambiental nuevos métodos y tecnologías de la información; incluso se podrían explorar medios legislativos y educativos con el fin de aumentar la participación ciudadana en decisiones relativas al medio ambiente; finalmente, se podrían fomentar o desarrollar conceptos que incrementaran el atractivo de los estilos de vida y patrones de consumo ecológicamente deseables. Puesto que las metas medioambientales entran parcialmente en conflicto con el crecimiento económico y la prosperidad creciente, podría ser útil que la generalizada interpretación de prosperidad como “abundancia” se sustituyese por una interpretación en términos de “calidad de vida”, que pudiera incluir una expansión de los aspectos no materiales del bienestar.

Tal cambio podría estimularse y apoyarse por la innovación tecnológica, pero su éxito depende de la innovación social y de un cambio de actitud.

Las experiencias de buenas prácticas en relación a la mitigación y adaptación al cambio global pueden jugar un papel importante. Según las Naciones Unidas, las buenas prácticas no son lo que pudiese considerarse como la mejor actuación imaginable sobre un determinado asunto del cambio global, sino aquellas actuaciones que suponen una transformación en las formas y procesos de actuación, y que pueden suponer el germen de un cambio positivo en los métodos de actuación tradicionales. Demostrando que la práctica produce, aquí y ahora, mejoras tangibles en las condiciones socioambientales en cualquiera de las esferas temáticas propuestas y no sólo esperanzas en cambios futuros o hipotéticos. En ese sentido, las buenas prácticas incluyen aspectos como la colaboración de varias entidades, de diversos órdenes públicos y privado. Una buena práctica también implica un refuerzo de las redes sociales y de la participación social. Las buenas prácticas son “ejemplos” que tienen una fuerte potencialidad de impactar el cambio social por “imitación”. Un área importante de buenas prácticas es la que puedan desarrollar aquellas instituciones y personas con potencialidad de producir un fuerte

impacto en la sociedad y, por tanto, pueden ser “ejemplificadoras”. Un buen ejemplo en este sentido es la reciente iniciativa de la Presidencia del Gobierno de España de adaptar el edificio de La Moncloa a sistemas de energías renovables y eficiencia energética ante el problema del aumento del consumo de energía, un problema central del cambio climático.

10.6. El papel de los medios de comunicación

La información es esencial, sin embargo, el público se encuentra abrumado por un exceso de información con mensajes a veces diametralmente opuestos. Por ejemplo, los escaparates de las librerías muestran en estos días ejemplares de los libros *El Mundo sin Nosotros* (Weiss, Debate, 2007), *Homenaje a Gaia* (Laetoli, 2005), del investigador James Lovelock, autor del concepto de Gaia como un planeta que se autorregula como un organismo vivo, y la novela *Estado de Miedo* (Plaza Janés, 2005), del autor de *best sellers* Michael Crichton. Mientras Lovelock postula que los impactos de la humanidad sobre el funcionamiento del sistema Tierra son tan intensos que es ya inevitable una crisis ambiental global que diezmará la población humana, Crichton —que no es un científico— articula el argumento en una trama de

ficción con una patina de ciencia a través de numerosas notas a pie de página y referencias, muy sesgadas y frecuentemente incorrectas, a artículos e informes científicos, de que las medidas correctoras propuestas para paliar el cambio climático carecen de base científica y obedecen a intereses ocultos de ciertos grupos que se esconden detrás de la promoción de la trama de la crisis ecológica global, inexistente según el autor.

Está claro que existe una necesidad de aportar información fiable y rigurosa al público, y que los medios de comunicación, incluyendo la actividad editorial de libros, supone la vía principal a partir de la cual los ciudadanos reciben información, creando opinión y decantando la toma de posición y actitudes de la sociedad, que a su vez retroalimenta la toma de decisión por los responsables políticos.

Dado que se trata de un problema con una componente científica fundamental, los informadores responsables de transmitir la información a la sociedad debieran contar con una especialización en ciencia y sociedad. Sin embargo, muy pocos medios de comunicación, los más poderosos económicamente, pueden permitirse el lujo de contar con comunicadores especializados en ciencia y sociedad. Esto plantea a veces una barrera de comunicación entre los investigadores o los resultados de su

investigación y los comunicadores que se traduce más frecuentemente de lo que debiera en imprecisión en la comunicación.

Para que la comunicación en torno a los aspectos científicos del cambio global, tanto en lo que respecta a la información como a la divulgación, sea responsable y verídica, es necesario que los medios dispongan de profesionales con formación adecuada. En este sentido, desde hace ya unos años en algunas universidades se vienen impartiendo estudios de comunicación y periodismo científico. Por ejemplo, el diario la Universidad Autónoma de Madrid y la Fundación BBVA imparten, en su escuela de periodismo, especialidades de periodismo ambiental y periodismo científico y la Universidad Carlos III de Madrid imparte un Máster en Periodismo y Medio Ambiente. Cabe esperar que, ante el creciente interés social por los retos ambientales, los medios de comunicación incrementen su demanda de dichos profesionales.

La mayor implicación de los investigadores en la diseminación a la sociedad y el establecimiento de una alianza sólida entre científicos y profesionales de la comunicación, para asegurar que la información transmitida sea precisa y veraz, resulta también imprescindible. Esta alianza estratégica debe vencer reticencias por ambas partes: por un lado, los científicos

sienten muchas veces pudor en ver sus opiniones plasmadas en la prensa porque originan frecuentemente críticas de sus colegas.

Esto se debe a que el proceso de traslación de la información científica al tratamiento sintético y comprensible para el ciudadano medio redundante frecuentemente en una simplificación del mensaje y, más veces de las deseables, en errores de interpretación, que son utilizados por otros científicos para cuestionar el conocimiento del investigador citado como fuente de la noticia. La comunidad científica está imbuida de un agudo espíritu crítico, prevalente en todos los colectivos cuya actividad implica una componente importante de creatividad, quizá particularmente desarrollada en nuestro país. Los riesgos de ser víctimas de las críticas y mofas de los colegas, junto con el esfuerzo adicional que supone participar en tareas de comunicación desaniman frecuentemente a los investigadores de participar en éstas.

Por otro lado, los comunicadores tienen dificultades en evaluar la fiabilidad de las fuentes, en el caso de problemas, como es el caso del cambio global, en los que pueden encontrar opiniones divididas. Los comunicadores podrían resolver estas dudas conociendo los indicadores de excelencia habituales en la evaluación científica y utilizarlos como indicadores, además de contrastando opiniones entre varios

científicos fiables. Muchos investigadores son reticentes a atender a los comunicadores, y, cuando lo hacen, frecuentemente ofrecen información ambigua o plagada de matices solamente comprensibles para otros expertos y de escasa utilidad como información para el ciudadano medio.

La alianza necesaria entre científicos y comunicadores requiere, por tanto, de la construcción de confianza entre ellos, que quizá se pueda ver facilitada por un manual de buenas prácticas elaborado conjuntamente.

En primer lugar es necesario romper con la visión apocalíptica con la que se nos muestra la mayoría de las veces el cambio global o alguno de sus componentes en especial el cambio climático, que se asemeja en muchos informes a una historia de horrores (inundaciones, sequías, extinciones en masa) propia de una película de catástrofes. Hoy sabemos que mensajes en negativo de carácter catastrofista generan rechazo e inmovilismo social frente a actitudes y comportamiento proactivos que estimulan y modulan el cambio de los patrones de consumo de los humanos. Este tratamiento negativo del problema puede explicar la paradoja de que todos los sectores sociales consideran al cambio climático como el mayor reto ambiental de la humanidad en el siglo XXI, mientras que es evidente que la respuesta social no se corresponde con la importancia del

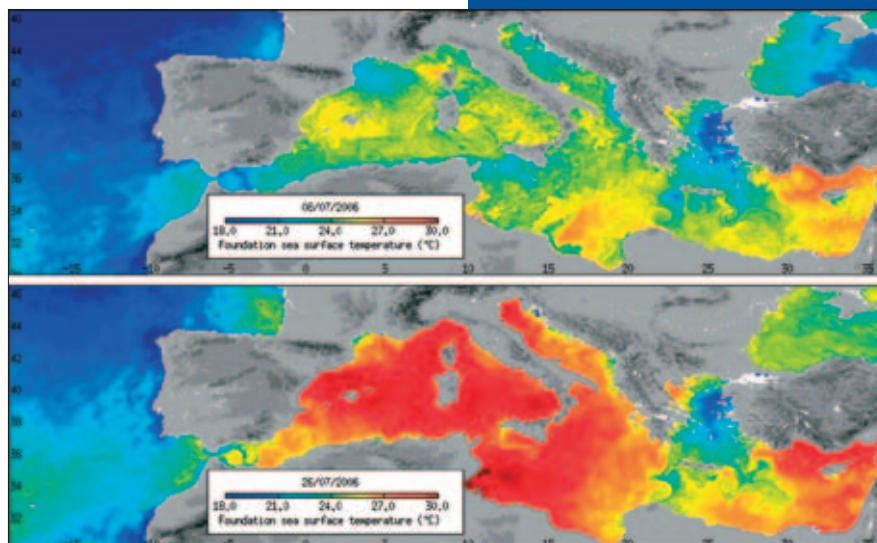


Figura 10.10. Mapa de temperatura superficial del agua de mar del Mediterráneo occidental mostrando un calentamiento de unos 8°C entre el 8 de julio y el 26 de julio de 2006, alcanzándose temperaturas extremas de 30°C.

Fuente: European Space Agency.

problema. Es necesario, para vencer esta inercia, enfatizar los cambios de actitud y estilo de vida que pueden adoptar los ciudadanos para contribuir a mitigar el problema de cambio global y adaptarse a sus consecuencias.

¿Es esto el cambio global?

Uno de los casos más frecuentes de confusión en los medios de comunicación y, por tanto, en la percepción de la sociedad es la propensión a plantear si un evento inusual determinado es o no una manifestación del cambio global.

Ejemplos recientes de éstos son, por ejemplo, el calentamiento extremo de



Cortesía de Antonio Fraguas, Forges (2006).

las aguas del Mediterráneo occidental durante julio de 2006 (figura 10.10.) y la proliferación de medusas en las costas del Levante español en agosto de 2006.

La cuestión de si estos acontecimientos puntuales, u otros como el huracán Katrina de 2005, son manifestaciones del cambio global o el cambio climático no pueden tener respuesta definitiva, pues el cambio global o cambio climático no se componen de eventos concretos sino de una pauta o un patrón estadístico de series de eventos consistentes con tendencias esperables o predicciones.

Por ejemplo, la aparición de masas de medusas en las playas alicantinas depende, entre otras cosas, del régimen de corrientes, vientos, etc., y una serie

de situaciones específicas independientes del proceso de cambio global. El calentamiento inusual del Mediterráneo depende del régimen de vientos, desplazamientos de masas de aire, nubosidad, corrientes marinas y otras condiciones específicas de la zona, que están afectadas sólo parcialmente por el calentamiento global. A nadie se le ocurre argumentar que un accidente de tráfico concreto, que depende de la pericia de los conductores, estado de las vías, condiciones meteorológicas, etc., pueda demostrar la eficacia o no del carnet por puntos establecido recientemente en nuestro país, pues todos entendemos que la efectividad de este sistema sólo puede evaluarse sobre una estadística suficiente. Esta misma

condición se aplica también al problema del cambio global.

Sí es posible evaluar, por ejemplo, si estos eventos específicos son consistentes con los patrones de variación esperados en función del cambio global y cambio climático. Así, estos eventos individuales podrían considerarse, si son consistentes con los patrones esperables, “huellas” del cambio global (ver cuadro 4.2). Así, el calentamiento anómalo de las aguas del Mediterráneo continúa una tendencia hacia el aumento de las temperaturas máximas que se ha constatado durante décadas y que parece haberse acelerado en los últimos cinco años, con máximos progresivos de temperatura en 2001, 2003 y 2006. La mayor intensidad, superficie afectada y duración de las proliferaciones de medusas continúa siendo una tendencia constatada durante las últimas décadas (Mills, 2004), en las que la abundancia de medusas se ha triplicado, y que es la esperable en función de la conjunción de la sobrepesca, que ha diezgado sus predadores y competidores, y el calentamiento global, que acelera el crecimiento de estos organismos.

Enmarcados en estas tendencias y las predicciones del cambio global es cuando estos eventos toman sentido más allá de las condiciones particulares que pueden haber concurrido en ellos.

De hecho el cambio global es la teoría científica más sencilla capaz de explicar el cúmulo de huellas del tipo de las tratadas aquí que vienen acumulándose año tras año, de forma que cada nueva huella refuerza el concepto y predicciones del cambio global.

Conflictos de intereses y desinformación sobre el cambio global

El cambio global es un problema en el que concurren importantes intereses, muchas veces con un trasfondo económico importante, que son particularmente aparentes en el caso del uso de combustibles fósiles y su papel en el cambio climático, que podría afectar al negocio de petroleras, empresas del sector, industrias asociadas (por ejemplo, automóvil) y los intereses económicos de poderosos países productores. Por la presencia de fuertes intereses, económicos, políticos y corporativos, enfrentados en torno a esta cuestión es preciso estar alerta a campañas de desinformación.

Uno de los baluartes de estas campañas de desinformación es y sigue siendo la incertidumbre científica. Como hemos indicado ya, la incertidumbre es una característica inherente de la ciencia moderna, dejando atrás épocas en que la certeza científica se defendía quemando en la hoguera a herejes que se atrevían a disentir de las teorías “ciertas”. La

ciencia no puede demostrar que algo es cierto, sino que su capacidad se limita a demostrar que algo no lo es o, más formalmente, falsificar hipótesis. Todas las teorías científicas que se pueden encontrar hoy en día en libros de texto son mejorables y están abocadas a ser sustituidas por otras teorías, que expliquen mejor y de forma más sencilla y general las observaciones.

Éste es el motor de la ciencia, que se debe entender adecuadamente sin que esto signifique que las teorías actuales no son fiables, sino simplemente que son mejorables. La ciencia no es la única actividad que ha de realizar su labor en presencia de incertidumbres y la actividad jurídica está frecuentemente aquejada de incertidumbres comparables. De hecho, esta similitud permite situar esta argumentación en términos quizá más familiares: lo que se puede plantear a la comunidad científica, en este caso particular, es si hay evidencia, más allá de una duda razonable, de que el planeta está sufriendo cambios fundamentales en su funcionamiento y que la actividad humana tiene un papel fundamental en estos cambios. La respuesta es claramente afirmativa, como recoge el IPCC en su informe de 2007, y presenta un amplísimo —aunque no universal— consenso en el seno de la comunidad científica. Aun así, una parte importante de los pocos investigadores que han mostrado

argumentaciones críticas o escépticas en relación al cambio global han visto frecuentemente su argumentación manipulada por grupos de presión interesados en sembrar dudas. Los periódicos *Los Angeles Times* y *New York Times* publicaron en 2006 escritos de investigadores (la historiadora de la ciencia Naomí Oreskes y el geólogo Meter Doran, respectivamente) que han visto cómo su trabajo ha sido utilizado y manipulado por agentes interesados en sembrar escepticismo frente al cambio global, incluso ante el Senado de EE.UU., y manifestando claramente su convencimiento de que el planeta se está calentando como resultado de la actividad humana. Más recientemente el libro de Michael Crichton siembra dudas, mediante un uso torticero y sesgado de la evidencia científica, sobre el cambio climático, presentándolo, en esta novela de ficción, como un complot ecoterrorista con la implicación de la comunidad científica. El mensaje de esta novela de ficción —que no ha sido, como tal, sujeta a los estrictos controles de veracidad y rigor aplicables a la literatura científica— ha sido utilizado políticamente como evidencia científica.

Así, Amy Ridenour, presidente del Centro Nacional para Investigación en Política Pública de EE.UU., escribe: “Crichton presenta abundante evidencia científica de que ni la temperatura del planeta ni el nivel del mar están aumentando” (Ridenour,



Playa en la isla Rottenest
(Australia Occidental).

Fotografía: C. M. Duarte.

2005). Mientras que los miles de artículos científicos publicados por los investigadores más prestigiosos en las revistas científicas más exigentes sólo son leídos por varios centenares de especialistas, el libro de M. Crichton vende millones de copias.

Está claro que la literatura científica no es el vehículo para crear opinión en la sociedad, a la que los investigadores sólo pueden tener acceso a través de los medios de comunicación de masas.

Un nuevo riesgo de desinformación en un contexto geopolítico de aumento del número de países que ambicionan

dotarse de armamento nuclear es la introducción de posibles agendas de desarrollo de armamento nuclear, camufladas bajo la argumentación de la necesidad de desarrollar fuentes de energía que no generen emisiones de gases de efecto invernadero. El desarrollo de energía nuclear para disminuir estas emisiones se ha de considerar seriamente, pero siempre con garantías suficientes de que no se persiguen otros fines. De hecho se trata de un debate candente que se decanta por opciones distintas en países de nuestro entorno, como Francia o Alemania.

Es fundamental que los comunicadores estén alerta a estos efectos, conozcan los mecanismos que existen en el seno de la comunidad científica para validar y evaluar conocimiento científico y busquen la opinión y asesoramiento de investigadores avalados por indicadores objetivos de excelencia.

Medios de comunicación y consumo

El aumento imparable del consumo de recursos es uno de los motores del cambio global. Los medios de comunicación tienen un claro impacto en la sociedad, tanto por los contenidos de su programación regular, que reflejan distintos modelos de estilos de vida, como por el impacto de la publicidad, que se canaliza a los

consumidores preferentemente a través de los medios de comunicación y que incluye muchas veces invitaciones a comportamientos contrarios al desarrollo sostenible. Este impacto conlleva una responsabilidad de los medios de comunicación sobre los patrones de consumo que directa o indirectamente promueven que se debería reflejar en una voluntad ejemplificadora en la sociedad. Esta misión ejemplarizadora debiera considerarse con particular atención en los medios públicos, cuya misión principal es prestar un servicio público.

La programación de los medios de comunicación públicos y privados debería incluir la divulgación de la problemática del cambio global y de las buenas prácticas en la vida cotidiana y proporcionar roles ejemplificadores en toda su programación de producción propia. Este comportamiento responsable de los medios de comunicación requiere una consideración especial en la adaptación de sus códigos deontológicos. Así, por ejemplo, el Estatuto de RTVE (Ley 4/1980) indica que el Consejo de Administración es responsable de dictar normas reguladoras del contenido de los mensajes publicitarios, lo que se entiende que debiera hacerse en función de la concepción de este ente que en sus

Estatutos incluye: “... se concibe como vehículo esencial de información y participación política de los ciudadanos, de formación de la opinión pública, de cooperación con el sistema educativo...”.

10.7. El papel de los ciudadanos

En las sociedades de consumo de masas, la responsabilidad en la producción de impacto ambiental se localiza en todas las instancias de la sociedad: la esfera de producción, del consumo, en el trabajo, en el hogar, en los ámbitos de ocio... Es por ello que abordar la mitigación y adaptación al cambio global requiere la participación responsable —con diferentes niveles de responsabilidad, claro está— de todas las instancias políticas, económicas, sociales, así como de todos los individuos que componen esa sociedad. En concreto, en las sociedades democráticas, la representación política —fundamental en el funcionamiento del sistema— es “reflejo” de la sociedad que la ha elegido, y, además, debe tender a responder a su electorado si aspira a seguir siendo elegida.

Pero el cambio global requiere importantes esfuerzos colectivos no

siempre fáciles de llevar a cabo, por lo que se precisa un fuerte liderazgo por parte de las instituciones para comprometerse ellas mismas y movilizar a la ciudadanía, y viceversa, que la ciudadanía más consciente y activa incida en las instancias políticas.

El nivel de conciencia de las sociedades sobre la cuestión medioambiental se ha desarrollado de forma muy destacable en las últimas décadas. El Eurobarómetro Especial de la Unión Europea (marzo 2008) sobre las actitudes de los ciudadanos europeos hacia el medio ambiente así lo pone de manifiesto (figura 10.11.).

Además, se ha producido un fuerte desarrollo de movimientos sociales a favor del medio ambiente, destacando el movimiento ecologista, pero también los sindicatos⁶, y otros, que cumplen —como instituciones de mediación social que son— una función importantísima en la concienciación y movilización de las sociedades a favor del medio ambiente.

Sin embargo se requiere avanzar mucho más en la creación de canales de participación en los asuntos medioambientales. Un ejemplo es la obligada por ley⁷ participación pública en las Evaluaciones de Impacto Ambiental, cuya aplicación es todavía muy limitada y burocratizada (Pardo, 2002).

6. Greenpeace; Ecologistas en Acción; Amigos de la Tierra, Adena-WWF, SEO-Birthlife, Comisiones Obreras, UGT, CGT, entre otros.

7. RD1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental.

EU-27	... un incentivo la inversión	... un obstáculo para el crecimiento económico	No sabe/ No contesta
BE	74%	21%	5%
BG	41%	13%	46%
CZ	69%	15%	16%
DK	71%	17%	12%
DE	63%	18%	19%
EE	63%	15%	22%
EL	72%	17%	11%
ES	61%	8%	31%
FR	71%	17%	12%
IE	48%	19%	33%
IT	69%	16%	15%
CY	58%	15%	27%
LV	55%	23%	22%
LT	48%	24%	28%
LU	57%	17%	26%
HU	50%	26%	24%
MT	57%	10%	33%
NL	80%	14%	6%
AT	61%	19%	20%
PL	61%	17%	22%
PT	69%	11%	20%
RO	43%	16%	41%
SI	65%	21%	14%
SK	64%	21%	15%
FI	79%	13%	8%
SE	63%	15%	22%
UK	57%	18%	25%

Figura 10.11. ¿Cuál de las siguientes frases corresponde más a su opinión personal?:

Políticas de protección medioambiental son más bien...

Fuente: Eurobarómetro (2008) Edición especial - Attitudes of European citizens towards the environment

Los procesos de participación social permiten el fomento, apoyo y creación de redes sociales (de carácter permanente) que profundicen en los contenidos y que asuman las acciones. Estas redes son la base para las políticas de coordinación.

La creación de canales estables de participación pública en las cuestiones del cambio global permite asegurar los siguientes objetivos:

- Establecer nexos entre la Administración y los ciudadanos.

- Informar a la población sobre los proyectos a realizar para minimizar y adaptarse al cambio global.
- Recoger información, aspiraciones y necesidades de la población.
- Implicar a la población en los procesos de decisión públicos.
- Respaldar las estrategias elegidas por los representantes políticos.

Los ciudadanos tienen un poder real en las sociedades democráticas para inducir las políticas ambientales adecuadas y necesarias para adaptarse al cambio global en sus diversas facetas.

Primero de todo, los ciudadanos deberían exigir un cumplimiento adecuado de las directivas y normativas ya vigentes, algo que no siempre ocurre.

Además, los ciudadanos debemos por un lado pedir el desarrollo de las normativas adecuadas para acelerar la implementación de políticas para la mejora del consumo energético, y también para reducir el consumo energético que ayudaría a controlar las emisiones de gases invernaderos y contaminantes. Estas exigencias de políticas ambientales, en todo caso, complementarán las mejoras en prácticas individuales y de estilo de vida de cada ciudadano. Los ciudadanos deben exigir, además, a los partidos políticos que incluyan su política medioambiental de forma clara y prominente en sus programas electorales y utilizar estos compromisos como una de las bases principales para apoyar o no en las urnas un determinado programa. Hasta que esto no ocurra es improbable que el medio ambiente y el cambio global ocupen el lugar destacado que debieran, como una de las principales amenazas a la sociedad, en la agenda política.

Sin embargo, las respuestas al cambio global por las sociedades humanas, sobre todo las desarrolladas, pasan por el cambio del estilo de vida de los individuos. Parece claro que




cualquier respuesta racional al fenómeno implica un conjunto de medidas relacionadas con el ahorro energético, energías alternativas y el uso racional de los servicios ambientales de los ecosistemas y la autocontención en el consumo. Este cambio requiere de un proceso de educación ambiental para el desarrollo sostenible promovido desde las instituciones a todos los niveles educativos, incrementando la toma de conciencia de los ciudadanos y la capacidad para generar actitudes de

cambio que impliquen el rechazo a determinados comportamientos irresponsables con el mantenimiento de la integridad ecológica de los ecosistemas y la aceptación de otros más racionales. Es ante todo fundamental que los ciudadanos entiendan que ellos no se encuentran impotentes ante el cambio global, sino que con pequeños cambios en sus estilos de vida pueden mitigar los efectos del cambio global y adaptarse mejor a éstos, y que su derecho al voto supone una herramienta

Desierto con promontorios: formaciones geológicas en el Pinnacle. National Park, Australia Occidental.

Fotografía: C. M. Duarte.



La aviación aérea es uno de los sectores que más emisiones de gases invernadero emite. La imagen muestra un avión volando a 10,000 m de altura sobre Islandia.

Fotografía: C. M. Duarte.

fundamental —ejercida responsablemente— para que se desarrollen políticas que contribuyan, junto con la suma de esfuerzos individuales, al mismo fin. Existen herramientas disponibles para ayudar a los ciudadanos a calcular cómo cambios en sus hábitos de vida pueden contribuir a disminuir su “huella” de carbono (i.e. las emisiones de CO₂ asociadas a su actividad), como, por ejemplo, la herramienta de calculadora de uso de carbono disponible en www.mycarbonfootprint.eu/es/. Algunas de estas herramientas permiten también evaluar la posibilidad de tomar medidas de mitigación para secuestrar parte del CO₂ que cada uno de nosotros emitimos. Estas herramientas contribuyen a concienciar al ciudadano sobre el importante papel que todos tenemos en esta cuestión y la posibilidad de reducir las presiones ambientales, en este caso las emisiones de CO₂, a partir de cambios asumibles en nuestro comportamiento y estilo de vida.

10.8. El papel de lo imprevisible

Aún así el problema del cambio global radica, esencialmente, en un problema de predicción. La predicción es sin embargo, como dijo Niels Bohr, “algo muy difícil, sobre todo si se trata del futuro”. Las predicciones que se pueden formular en cuanto a la evolución del clima y sus posibles consecuencias están sujetas a grandes incertidumbres derivadas, por ejemplo —como se ha indicado antes—, de las posibles interacciones complejas, no lineales, entre componentes del cambio global. Entre estas incertidumbres se encuentran contingencias o eventos que no pueden ser anticipados ni predichos, incluidos desarrollos tecnológicos y contingencias sociopolíticas. Así por ejemplo, es posible que el cambio en patrones de uso de energía no resulte de la necesidad de disminuir las emisiones derivadas del consumo de combustibles fósiles para mitigar el efecto invernadero, sino que vengan eventualmente de consideraciones de

seguridad geopolítica por las que sociedades occidentales impulsan el uso de energías que no generan gases invernadero en un intento de disminuir su dependencia de los combustibles fósiles para evitar así verse afectados por perturbaciones en las regiones productoras. Igualmente el aumento del precio del petróleo podría inspirar el afán de contención del consumo que la concienciación individual no ha alcanzado a desarrollar.

Algunas de estas contingencias se pueden contemplar en forma de escenarios que, como hemos visto, combinan modelos científicos de regulación climática con hipótesis, o escenarios de la evolución de los motores antrópicos del clima. Sin embargo, en un horizonte de 100 años, a los cuales aspiran a alcanzar estos escenarios, es más que probable que contingencias tan remotas como para evitar el que puedan ser incluidas en escenarios plausibles acaben por jugar un papel importante. Estas contingencias pueden tener su base en procesos asociados al cambio global (por ejemplo, cambios bruscos en clima,

disponibilidad de agua o perturbaciones), contingencias en política internacional o avances imprevisibles en la ciencia y la tecnología. Es importante que la sociedad, y sus líderes en particular, estén particularmente alerta, en un contexto de gestión adaptativa del cambio global, a la aparición de tales contingencias para aprovechar sin demora las oportunidades que ofrezcan o afrontar —en caso de contingencias negativas— los nuevos riesgos que generen.

Se puede pensar en muchas de estas incertidumbres como un problema de gestión de riesgos. Por ejemplo, el coste de un 1% del PIB global para evitar daños derivados del cambio climático que podrían alcanzar un 20% del PIB global equivale a pagar un 5% del coste de un evento incierto, pero probable. Esta cantidad relativa es similar al coste de una prima de seguro de vehículos, cuando la probabilidad de los cambios asociados al cambio global es ya mucho mayor que la de un siniestro total en el caso de un vehículo cualquiera.

10.9. Geoingeniería

El término geoingeniería se refiere a la manipulación deliberada de las condiciones del planeta Tierra y ha surgido fundamentalmente para designar propuestas de soluciones para mitigar el cambio climático a través de la manipulación de algún componente

del planeta Tierra. Se trata, en su mayor parte, de extrapolaciones realizadas a partir de relaciones o procesos conocidos e investigados a pequeña escala. Una de las limitaciones de la geoingeniería es que la experimentación de las propuestas que se van formulando sólo es posible a escala pequeña, dado que su aplicación a escala global supondría ya una aplicación directa, debido a la singularidad del planeta Tierra. De hecho, la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, o la emisión de gases CFC's, han supuesto actuaciones no deliberadas de geoingeniería, pues estas actuaciones han alterado el comportamiento planetario del clima y de la capa de ozono, respectivamente. Sin embargo, en la geoingeniería, estas actuaciones se proponen de forma deliberada, con el objeto de mitigar el cambio climático.

La geoingeniería es, en cuanto a las propuestas, un campo de juego de científicos respetables y destacados, como Paul Crutzen, premio Nobel de Química, o James Lovelock, investigador que propuso la hipótesis de Gaia, que concibe el planeta como un sistema autoregulado. Algunas de ellas están, además, publicadas en las mejores revistas científicas, incluyendo *Nature* o *Science*. Es decir, no son fantasías, sino soluciones con fundamentos científicos sólidos. De hecho la geoingeniería es un término

vernáculo para referirse a una disciplina científica transdisciplinar emergente, la ingeniería y manejo del sistema Tierra (Allenby 2008).

La primera propuesta de geoingeniería surgió en 1977 cuando Cesare Marchetti propuso la inyección de CO₂ en la corriente de salida de agua del Mediterráneo al Atlántico, en cuya cuenca se hunde, como técnica de mitigación del cambio climático. Ésta supone también el primer uso del término geoingeniería en la literatura científica. Las propuestas de geoingeniería actuales pretenden mitigar el cambio climático actuando sobre la atmósfera o sobre los océanos. Algunas propuestas actúan sobre la penetración de radiación solar en la atmósfera, como, por ejemplo, inyectando partículas de azufre en la atmósfera para estimular el desarrollo de nubosidad, afectando al albedo global, y reducir así la incidencia de radiación solar sobre la superficie terrestre (Crutzen, 2006). Otras pretenden usar tuberías que bombeen, usando la energía del oleaje, agua oceánica profunda a la superficie para enfriar la atmósfera (Lovelock y Rapley, 2007). Otras pretenden estimular la producción del plancton marino mediante la inyección de hierro en el océano, incrementando de esta forma la captura de hierro por el océano (Buesseler y Boyd, 2003).

Sin embargo, las opciones de geoingeniería son polémicas, ya que su



Susana Agusti, coautora de esta obra,
contemplando un acuario de peces
tropicales en el Oceanografic de València.
Fotografía: C. M. Duarte.

aplicación podría desencadenar efectos negativos no anticipados que podrían resultar irreversibles (Schneider, 2008). Por ello, la mayor parte de las opciones de geoingeniería han sido desacreditadas por la comunidad científica como opciones de mitigación del cambio climático (Chisholm *et al.*, 2001) e incluso han sido prohibidas por convenciones internacionales. Por ejemplo, la convención de Londres, que regula los vertidos de sustancias potencialmente peligrosas al océano, ha sido actualizada para prohibir la fertilización del océano con hierro a

gran a escala, a excepción de las realizadas —a pequeña escala y en zonas no protegidas del océano— con fines científicos.

Es importante considerar, sin embargo, que la investigación científica de posibles soluciones de geoingeniería utilizando modelos y experimentos controlados de laboratorio o de pequeña escala se debe considerar seriamente, no sólo porque contribuye a comprender mejor el funcionamiento de la biosfera y evaluar nuestra capacidad predictiva sobre los procesos implicados, sino que

los progresos que se puedan hacer mejorarán nuestro conocimiento y capacidad de aplicar estas técnicas si en algún momento futuro los riesgos asociados a su aplicación descienden por debajo de los asociados al proceso de cambio climático. Mientras que la ingeniería y manejo del sistema Tierra es un área legítima de investigación científica, su aplicación a la mitigación del cambio climático conlleva una decisión política que ha de sopesar, utilizando el principio de precaución, los riesgos y beneficios asociados.

Referencias

- AEMA (2004). *Impacts of Europe's changing climate, EEA Report No. 2/2004*, http://reports.eea.europa.eu/climate_2_2004/en
- ALLENBY, BRAD (lead author); LYON, WALTER A. AND MATLOCK, MARTY (topic editors) (2008). "Earth systems engineering and management." In: *Encyclopedia of Earth*. Eds. Cutler J. Cleveland (Washington, D.C.: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment). [First published in the Encyclopedia of Earth January 1, 2008; Last revised October 6, 2008; Retrieved August 28, 2009].
- BARRETT, S. (2003). *Environment and Statecraft*. Oxford University Press.
- BUESSELER, K. O. y BOYD, P. W. (2003). "Will Ocean Fertilization Work?", *Science*, 300: 67-68.
- CE (2001). *La Gobernanza Europea, un Libro Blanco*, COM (2001) 428 final de 25.7.2001. Copenhagen, 2005.
- CHISHOLM, S. W.; FALKOWSKI, P. G. y CULLEN, J. J. (2001). "Dis-Crediting Ocean Fertilization". *Science*, 294: 309-310.
- CROSBY, ALFRED, W. Y DONALD WORSTER (1986). *Ecological Imperialism: The Biological Expansion of Europe, 900-1900*, Cambridge University.
- CRUTZEN, P. J. (2006). "Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma?", *Climate Change*, 77: 211-219.
- DIAMOND, J. (2005). *Colapso. Por qué unas sociedades perduran y otras desaparecen*. Debate. Barcelona.
- ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (2006). *The International Energy Outlook 2006*.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2005). *The European Environment. State and Outlook EEA*.
- FIORINO, D. J. (1990). "Citizen Participation and Environmental Risk: A Survey of Institutional Mechanisms". *Science, Technology and Human Values*, 15 (2) Primavera.

- FOLKE, C. (2004). "Enhancing resilience for adapting to global change". In : Steffen, W. et al *Global Change and the earth system. A planet under pressure*: 287. The IGBO Series.
- FOLKE, C. ET AL. (2002). "Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformation". *ICSU Series on Science for Sustainable Development N° 3*.
- HOLLING, CS. & MEFFE, GK. (1996). "Command and Control and the pathology of natural resource management". *Conservation Biology* 10: 328-337.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 3 volúmenes.
- KAHN, ALFRED E. (1988). *The Economics of Regulation: Principles and Institutions*, MIT Press.
- LOVELOCK, J. E. y RAPLEY, C. G. (2007). "Ocean pipes could help the earth to cure itself", *Nature*, 449: 403.
- MACKENZIE, D. y WAJCMAN J. (ED.) (1998). *The Social Shaping of Technology*, Buckingham: Open University Press.
- MANCHETTI, C. (1977). "On geoengineering and the CO₂ problem". *Climate Change*, 1: 59-68.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005). *Ecosystems & Human Well-Being: Wetlands and water Synthesis*. World Resources Institute, Washington, D.C.
- MILLS, C. E. (2004). "Jellyfish blooms: are populations increasing globally in response to changing ocean conditions?", *Hydrobiologia* 451: 55-68.
- PARDO, Mercedes (2008). "Hacia una Comunidad Epistémica de Cambio Socioambiental Global". Notiweb Mi+d [http://www.madrimasd.org/informacionldi/analisis/analisis/analisis.asp?id=34834&sec=17](http://www.madrimasd.org/informacionldi/analisis/analisis/analisis.asp?id=34834&sec=17://www.madrimasd.org/informacionldi/analisis/analisis/analisis.asp?id=34834&sec=17)
<http://www.madrimasd.org/informacionldi/analisis/analisis/analisis.asp?id=34834&sec=17>
<http://www.madrimasd.org/informacionldi/analisis/analisis/analisis.asp?id=34834&sec=1733/3/06/200806/2008>
- RIDENOUR, A. (2005). "Michael Crichton's State of Fear: Climate Change in the Cineplex?", *National Policy Analysis*, n° 524, febrero 2005.
- SCHNEIDER, S. (2008). "Geoengineering: could we or should we make it work? Philosoph. Transact". *Royal Soc.*, 366: 3843-3862.

11. Perspectiva

La exposición precedente ha aportado respuestas, esperamos claras, a algunos de los interrogantes planteados al inicio. Está claro que estamos plenamente inmersos en un proceso de cambio global, que afecta a todos los procesos que gobiernan el sistema Tierra cuyo funcionamiento está afectado por la actividad humana.

El conocimiento científico disponible permite prever cuáles serán los cambios más importantes que tendrán lugar durante el siglo XXI, dentro de amplios márgenes de incertidumbre en cuanto a la magnitud de estos cambios, que dependen a su vez de incertidumbres en la progresión de la presión de la actividad humana, pero que recogen las tendencias que con toda probabilidad viviremos y configurarán el planeta que conocerán las generaciones futuras.

El cambio global es una fuente potencial de conflictos sociales, deterioro

de la salud humana y pérdida de la capacidad de mantener el bienestar y seguridad de la humanidad tanto presente como la de generaciones futuras.

Es necesario pues generar cambios sociales dirigidos a fomentar buenas prácticas que permitan que la sociedad se adapte y mitigue estos impactos y los riesgos asociados. Para ello es esencial alcanzar una cuota de utilización de los recursos que contiene la biosfera que permita conservar su diversidad biológica y funcional, asegurando así la provisión de bienes y servicios a toda la humanidad.

Esto requiere una sociedad científicamente culta, con ciudadanos dotados del conocimiento científico necesario para poder evaluar las consecuencias de sus decisiones cotidianas, actuando así como ciudadanos responsables. Nuestra sociedad dista, lamentablemente, de poderse definir

como científicamente culta, lo que requiere un esfuerzo de todos, científicos, educadores, gobiernos, padres e individuos, por socializar el conocimiento científico. Aunque la información es una condición necesaria para la actuación, los estudios sociológicos disponibles demuestran que por sí sola es insuficiente. Esta información ha de ir acompañada de opciones de estilos de vida, incluyendo opciones de consumo, que permitan canalizar esa información en actuaciones concretas. La distancia, a menudo enorme, entre la información de un problema de dimensión global y la realidad de nuestras vidas cotidianas supone el mayor obstáculo para que la información se traduzca en acción social.

En la búsqueda de estas nuevas opciones de vida y de consumo puede hallarse no sólo la solución a algunos de los problemas sino, además, no pocas oportunidades de desarrollo social. Este desarrollo ha de encontrar, además, nuevos objetivos, alejándose de indicadores como la riqueza económica, para centrarse en otros más relevantes para los individuos, como la felicidad. En la Declaración de Independencia de los Estados Unidos de América (4 de julio de 1776), un bellissimo texto, se puede leer: “Mantenemos que las siguientes verdades son evidentes, que todos los hombres [tienen] ciertos derechos inalienables, y que entre éstos se encuentran la Vida, la Libertad, y la búsqueda de la Felicidad...”. Todos los estudios

sociológicos demuestran que no existe una relación continua entre felicidad, o grado de satisfacción vital, y riqueza; de forma que partiendo de la pobreza, la felicidad aumenta rápidamente a medida que los recursos aumentan, pero esta relación pronto alcanza un máximo por encima del cual mayor riqueza no redundará en mayor felicidad, sino que ésta se debilita. Esta relación parabólica entre felicidad y riqueza nos hace recordar la definición que Channing Pollock dio de la felicidad como “una estación de parada en el camino entre lo demasiado y lo muy poco”.

Economistas asociados en la Fundación para la Nueva Economía (www.neweconomics.org/gen/) han diseñado un índice de felicidad (ver www.happyplanetindex.org), en el que el producto de la esperanza de vida y el grado de satisfacción personal de una sociedad, este último medido en una escala de 0 a 1, indica el número de años de felicidad del que sus ciudadanos disfrutaron durante sus vidas. Este indicador se sopesa por la huella ecológica de la sociedad evaluada, valorando de esta forma el coste, en recursos naturales, de la felicidad o satisfacción de una sociedad. Resulta interesante reconsiderar el objetivo del desarrollo social a reportar la máxima felicidad con el mínimo consumo de recursos naturales.

El cambio global es un problema de tal complejidad y consecuencias para nuestra calidad de vida que no hemos de

escatimar esfuerzos para comprender mejor sus causas, mejorar nuestra capacidad de predecir sus consecuencias y desarrollar la capacidad para mitigarlas a la vez que adaptarnos a los cambios. Esta tarea requiere el esfuerzo de todos, sin excepción, y un comportamiento especialmente solidario con los más débiles y desfavorecidos que sufrirán las consecuencias del cambio global de forma particularmente aguda. La capacidad de liderazgo se demostrará, a nivel local, regional, nacional y global, por la visión y firmeza en afrontar este desafío.

Recordando el inicio de la *Historia de dos ciudadanos*, de Charles Dickens (1859):

*Era el mejor de los tiempos.
Era el peor de los tiempos.
Era la época de la sabiduría.
Era la época de la locura.
Era la época de la credulidad.
Era la época de la incredulidad.
Era la estación de la luz.
Era la estación de la oscuridad.
Era la primavera de la esperanza.
Era el invierno de la desesperanza.*

Todo esto puede ser cierto a la vez en este tiempo de cambio. Está en nuestra mano que los tiempos que vienen sean la estación de la luz o de la oscuridad. Tomemos la responsabilidad de construir nuestro futuro, un futuro de felicidad y respeto con la naturaleza. En ello nos va todo.

12. Enlaces recomendados

- Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, <http://www.eea.eu.int>) publica informes periódicos de gran interés, algunos traducidos al castellano. Particularmente útil es el informe de cambio climático publicado en agosto de 2004 (EEA Report 2 2004). Información en español se puede obtener en <http://reports.es.eea.eu.int/>
- Alianza para la Resiliencia. Consorcio de investigadores centrados en el estudio de los sistemas socio-ecológicos. www.resalliance.org/1.php
- Centro Hadley para Predicción e Investigación Climática. www.metoffice.gov.uk/research/hadleycentre/index.html
- Comité Español de Investigación del Cambio Global, CEICAG. www.uc3m.es/ceicag/. Es un comité que engloba en España, entre otros, a los comités de investigación internacionales en cambio global integrados en el Earth Science System Partnership (ESSP) de ICSU, con el fin de promover la participación de los investigadores españoles en los programas internacionales, así como de crear una comunidad epistémica de cambio global en España.
- Consorcio para la Ciencia del Sistema Tierra. Consorcio internacional de investigadores para la integración científica en torno a la ciencia del sistema Tierra. www.essp.org/
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Protocolo de Kioto y otros desarrollos para la prevención del cambio climático. http://unfccc.int/portal_espanol/items/3093.php

Convención para la Diversidad Biológica. www.biodiv.org/default.shtml
Diversitas, Programa Internacional de Investigación en Biodiversidad.
www.diversitas-international.org/

Energy Information Administration (EE.UU.). Proyecciones y estadísticas de uso de energía global. www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html

Evaluación del Milenio. La Evaluación de Ecosistemas del Milenio (Millenium Assessment, MA) es un programa de trabajo internacional diseñado para dar a gestores, políticos y público en general información científica sobre las consecuencias de los cambios en los ecosistemas para el bienestar humano y las opciones de respuesta frente a esos cambios. www.maweb.org/en/index.aspx. El cambio climático queda enmarcado dentro de los demás motores del cambio global. Los informes están en inglés, pero hay versiones en español. Acaba de hacerse pública una evaluación integrada (Synthesis report) que puede consultarse en <http://www.millenniumassessment.org/>

Frena el cambio climático. Campaña de divulgación ciudadana de varias ONGs sobre las consecuencias del cambio climático y cómo mitigarlo modificando pautas ordinarias de comportamiento. www.frenaclambioclimatico.org

Global Change Master Directory. Directorio de datos y servicios sobre cambio global.
<http://gcmd.nasa.gov/>

Greenhouse Effect Research Today. Revista mensual en inglés sobre noticias variadas en relación al cambio climático, gratuita y muy recomendable.
(<http://greenhouseeffect.researchtoday.net>)

Greenpeace (<http://archivo.greenpeace.org/Clima/cambioclim.htm>). Contiene buenos resúmenes sobre los tres informes del IPCC y también sobre el Protocolo de Kioto.

Grupo de Observación de la Tierra, GEO, www.earthobservations.org
Informe sobre el cambio climático y sus impactos realizado en Portugal, muy completo, en inglés, y cuya segunda fase está en curso, puede consultarse (y descargarse los capítulos) en <http://www.siam.fc.ul.pt>

Informe Stern sobre el impacto económico del cambio climático. Estudio de gran impacto mediático sobre las consecuencias económicas del cambio climático encomendado por el gobierno británico.
http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/sternreview_index.cfm

IPCC. Panel Internacional para el Cambio Climático. Foro científico para el análisis y formulación de escenarios de cambio climático. www.ipcc.ch/

La Criosfera de Hoy. Tendencias Globales en la Extensión de Hielo. Universidad de Illinois, USA. <http://arctic.atmos.uiuc.edu/cryosphere/>

Nacional Oceanic and Atmospheric Administration, USA. Página principal: www.noaa.org ; Investigación en el Ártico: www.arctic.noaa.gov; Sistema de Observación Terrestre: www.noaa.org/eos.html. Centro Nacional de Huracanes: www.nhc.noaa.gov/

Observatorio de la Tierra de la Agencia Espacial Europea. www.esa.int/esaEO/index.html

Observatorio de la Tierra de la NASA. <http://earthobservatory.nasa.gov>

Oficina Española de Cambio Climático, perteneciente al Ministerio de Medio Ambiente, tiene una página web con información actualizada (<http://www.mma.es/oecc>). De momento lo más interesante es la extensa evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático de la que pueden descargarse los capítulos en http://www.mma.es/portal/secciones/cambio_climatico/documentacion_cc/historicos_cc/impactos2.htm

Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) crearon el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en 1988. Se trata de un grupo abierto a todos los miembros de las Naciones Unidas y de la OMM. El IPCC es el principal órgano internacional de referencia en cambio climático y hace una evaluación periódica del estado del conocimiento. Actualmente está disponible el tercer informe realizado en 2001 y que se articula en tres secciones, la base científica, impactos y su mitigación. Los documentos originales están en inglés, pero hay buenos resúmenes en castellano en <http://www.ipcc.ch/languageportal/spanishportal.htm>

Organización Meteorológica Mundial, www.wmo.int

Portal de cambio climático del Ministerio de Medio Ambiente de España, www.mma.es/portal/secciones/cambio_climatico/

Programa Internacional IHDP. Programa Internacional de la Dimensión Humana del Cambio Global. <http://www.ucm.es/info/iuca/IHDP.htm>

Red temática del programa internacional CLIVAR (CLImate VARIability and Predictability) del World Climate Research Programme (WCRP). www.clivar.org/

Redes de Observación e Investigación de Ecosistemas a Largo Plazo. España: www.redote.org; EEUU: www.iltinternet.edu; Europa: www.alter-net.info; Internacional: www.iltinternet.edu.

Secretaría de la Convención de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (UNFCCC de las siglas en inglés) presenta información en inglés sobre el marco internacional, los convenios, acuerdos y protocolos como el de Kioto que quedan bajo su directa responsabilidad (<http://unfccc.int>). Tiene una sección en español en http://unfccc.int/portal_espanol/items/3093.php
Secretaría de la Convención de Lucha contra la Desertificación, www.unccd.int/

Sobre los autores



Juan Carlos Abanades es investigador científico del CSIC. Dirige desde el INCAR proyectos de captura de CO₂ mediante CaO. Coautor del Informe Especial del IPCC sobre Captura y Almacenamiento de CO₂. Es miembro del Grupo de Trabajo sobre captura de CO₂ de la Plataforma Tecnológica Europea de Emisiones Cero y del equipo de editores de la revista "International Journal of Greenhouse Gas Control" de la Agencia Internacional de la Energía/Elsevier.



Susana Agustí es profesora de Investigación del CSIC en el MEDEA (CSIC-UIB). Es miembro del Comité Polar de la European Science Foundation. Ha participado en más de 10 campañas de investigación polares, en la Antártida y el Ártico. Su investigación se centra en comprender el impacto del cambio global (aumento de la radiación ultravioleta, calentamiento global, aportes de contaminantes y sus interacciones) sobre los organismos fotosintéticos del océano.



Sergio Alonso es catedrático de Meteorología en la Universitat de les Illes Balears. Fue gestor del Programa Nacional de I+D sobre el Clima y miembro de la delegación española para la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Su investigación está centrada en meteorología y clima del Mediterráneo occidental.



Gerardo Benito es investigador del Centro de Ciencias Medioambientales del CSIC, en Madrid. Actualmente, es presidente de la Comisión Internacional de Paleohidrología Global de INQUA, miembro del Comité Español de IGBP, como representante del programa internacional PAGES (Past Global Changes), y miembro del Comité Español de INQUA. Su investigación se centra en los riesgos naturales, la reconstrucción de registros hidrológicos del pasado para su interpretación paleoclimática, y en temas relacionados con la hidrología y la erosión de suelos.



Juan Carlos Ciscar es doctor en Ciencias Económicas por la Universidad de Valencia y titulado en Economía Monetaria y Financiera por el Centro de Estudios Monetarios y Financieros (CEMFI) del Banco de España. Desde 1996 pertenece al Grupo de Economía del Cambio Climático, Energía, y Transporte del Instituto de Prospectiva Tecnológica (IPTS) de la Comisión Europea. En la actualidad trabaja en la cuantificación de los costes de reducir emisiones de gases de efecto invernadero y en la evaluación de las consecuencias económicas del cambio climático.



Jordi Dachs es científico titular del CSIC en el Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales de Barcelona y vocal del subcomité SOLAS (Surface Ocean-Lower Atmosphere Study) del IGBP. Su investigación se centra en el ciclo de los contaminantes orgánicos y la materia orgánica, con especial énfasis en los procesos de deposición atmosférica y las múltiples interacciones entre el océano y la atmósfera que regulan el transporte, destino e impacto de los compuestos orgánicos.



Carlos M. Duarte, coordinador de esta obra, es profesor de Investigación del CSIC en el Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA, CSIC-Universidad de les illes Balears) y fue presidente del Comité Español de IGBP entre 2000 y 2005, actualmente es presidente de la Asociación Americana de Limnología y Oceanografía y miembro del Comité Científico del European Research Council. Premio Nacional de Investigación en Recursos Naturales en 2007 y Premio Rey Jaime en Protección del Medio Ambiente en 2009. Su investigación se centra en el estado y funcionamiento de los ecosistemas marinos y el impacto del cambio global sobre éstos. Coordina el Postgrado en Cambio Global del CSIC y la UIMP.



Joan O. Grimalt es profesor de Investigación del CSIC y director del Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDÆA, CSIC). Es presidente de la Sociedad Española de Cromatografía y Técnicas Afines (SECyTA). Premio Rey Jaime I en Protección del Medio Ambiente en 2005, premio Ciudad de Barcelona de Investigación en 2000 y premio Medio Ambiente del Institut d'Estudis Catalans en 2001. Su investigación se centra en la utilización de los compuestos orgánicos (naturales y contaminantes) para conocer el estado de salud de los ecosistemas, los organismos que contienen y los humanos. También utiliza dichas moléculas para conocer la evolución de los ecosistemas y así contribuir al conocimiento del cambio global.



Iván López es profesor de Sociología y de Métodos de Investigación Social de la Universidad Carlos III de Madrid. Su investigación se centra en la teorización y aplicación del Desarrollo Sostenible en la Agenda 21 Local, en la democracia deliberativa y la participación social en las políticas medioambientales, así como en métodos de investigación social.



Carlos Montes es catedrático de Ecología en la Universidad Autónoma de Madrid. Es presidente de la Fundación Interuniversitaria Fernando González Bernáldez para el estudio y la gestión de los espacios naturales. Su investigación se centra en el análisis de las interrelaciones entre ecosistemas y humanos bajo la trama conceptual de los sistemas socioecológicos y la resiliencia.



Mercedes Pardo Buendía es profesora de Sociología del Cambio Climático de la Universidad Carlos III de Madrid y presidenta del Comité Español de Investigación en Cambio Global, CEICAG. Su investigación aborda la sociología del cambio climático y del cambio global, de la energía, la ciudad, los residuos, las políticas medioambientales, los valores sociales y la participación pública.



Aida F. Ríos es investigadora científica del CSIC en el Instituto de Investigaciones Marinas de Vigo y presidenta del Comité Español de IGBP. Su investigación se centra en el sistema del carbono en agua de mar, especialmente en la captación de CO₂ antropogénico por parte del océano y su relación con el cambio global.



Rafel Simó es investigador científico en el Institut de Ciències del Mar del CSIC, en Barcelona. Es miembro del comité científico del programa internacional SOLAS (Surface Ocean-Lower Atmosphere Study) y miembro del Comité Español de IGBP. Su investigación se centra en los intercambios de materia entre la biota marina y la atmósfera, particularmente gases y aerosoles, y sus respuestas al cambio global.



Fernando Valladares, investigador científico del CSIC, es ecólogo terrestre y trabaja en la interfase entre la ecofisiología, centrada en mecanismos, y la ecología de poblaciones y comunidades, centrada en procesos, para comprender la respuesta de las plantas a cambios ambientales y condiciones adversas. Su actividad científica la combina con la participación en comités y sociedades nacionales e internacionales relacionadas con el cambio global (AEET, ESA, BES, IGBP), con el establecimiento de una red española de seguimiento a largo plazo de ecosistemas (www.redote.org <<http://www.redote.org/>>) y con la docencia universitaria.

