

ÍNDICE

Prólogo.....	7
Indicadores paleoecológicos en sedimentos lacustres..... Noemí Fuentes Molina, Penélope González Sampériz	9
Algunas notas sobre la evolución de la complejidad sutural en los cefalópodos ammonoideos..... Juan Antonio Pérez Claros	21
Una perspectiva paleobotánica –y por tanto heterodoxa– para las grandes extinciones..... José S. Carrión, Santiago Fernández, Noemí Fuentes	31
La vegetación forestal en el Terciario..... Eduardo Barrón, Daniel Peyrot	55
Paleobiología de los carnívoros con dientes en forma de sable: el juego de la vida y la muerte en el Cenozoico..... Paul Palmqvist, Vanessa Torregrosa	77
Las fluctuaciones relativas del nivel del mar durante el Cuaternario tardío en la Pampa argentina..... Aldo Prieto, Isabel Vilanova, Silvina Stutz	89
Carbones y cenizas, ¿qué nos cuentan del pasado?..... Ernestina Badal	103
Las diatomeas: su papel en la productividad primaria y en las reconstrucciones paleoceanográficas..... Óscar E. Romero, María Ángeles Bárcena	117
La huella de los cambios climáticos rápidos del pasado reciente en los sedimentos marinos: dos ejemplos del Mediterráneo Occidental..... Ana Moreno, Jaime Frigola, Isabel Cacho, Miquel Canals, Joan O. Grimalt	127
El Niño - La Oscilación del Sur (ENSO) y su registro en los sedimentos: evolución paleoclimática de este fenómeno durante los últimos 130.000 años..... Santiago Giral, Ana Moreno, Alberto Sáez Roberto Bao, Penélope González, Blas L. Valero, Juan José Pueyo, Conxita Taberner	135

Respuesta de productividad biológica marina al cambio climático: el Mar Mediterráneo como ejemplo de laboratorio natural	143
Francisca Martínez-Ruiz	
Interés paleoecológico de los foraminíferos.....	151
Virgínia Martins, Alveirinho Dias, Jean-Marie Jouanneau Olivier Weber, Celso Gomes, Fernando Rocha	
En los orígenes del Pleistoceno: faunas de las dos Iberias (mediterránea y caucásica).....	165
Alfonso Arribas, Guiomar Garrido	
Neandertales y humanos modernos en ecosistemas mediterráneos.....	177
Clive Finlayson, José S. Carrión	
Reconstrucción de paleoambientes en zonas áridas: investigaciones en el Desierto del Namib.....	191
Graciela Gil Romera, Louis Scott	
Paleoclimatología, biogeografía y evolución en el Mundo Perdido.....	203
Valentí Rull	
Efecto del cambio climático en el Mar Mediterráneo.....	213
Arnaldo Marín Atucha	
Certezas e incertidumbres sobre el impacto del cambio global en los ecosistemas terrestres.....	233
Fernando Valladares	
Glosario.....	247
Autores.....	257

Certezas e incertidumbres sobre el impacto del cambio global en los ecosistemas terrestres

El cambio global es una combinación de cambios cuyo núcleo es el clima

El clima cambia y a nadie con una perspectiva geológica o al menos histórica debería sorprender, ya que el planeta nunca ha permanecido con el mismo clima más allá de unos pocos siglos. Lo que nos preocupa ahora es la tasa y el sentido de este cambio climático. Las predicciones del clima que sufriremos en la segunda mitad del siglo XXI no son nada halagüeñas. Los escenarios que se barajan actualmente sobre el clima que tendremos en nuestras latitudes oscilan entre malos y malísimos. En general, el calentamiento global irá asociado con una mayor frecuencia de eventos extremos (e.g., olas de calor y de frío, inundaciones) y una elevación sustancial del nivel del mar. Para el caso de la Península Ibérica la combinación de mayores temperaturas y menor precipitación dará lugar a una mayor aridez (figura 1), posiblemente acrecentada por una mayor demanda de agua por parte de la población local.

No obstante, existe una horquilla de probabilidad para cada suceso y todo un abanico de escenarios, y no son todos igual de catastróficos. En buena medida, el que lo sean o no dependerá de lo que hagamos en las próximas décadas.

Si las emisiones de CO₂ se mantienen altas, por ejemplo, el incremento térmico previsible para el final del siglo XXI en algunos puntos de la Península Ibérica podría superar los seis grados centígrados respecto al período 1961-1990 (figura 1). Pero este escenario tan extremo no es muy probable, ya que existen numerosas iniciativas que pretenden cambiar nuestra política de emisiones de CO₂ (ver apartado sobre el convenio de Kioto más adelante). Aún así, un incremento de "sólo" cuatro grados centígrados en la temperatura media de la atmósfera podría bastar para que las latitudes medias y altas del hemisferio norte entraran en una glaciación debido a la alteración de la corriente termohalina del océano Atlántico, que actúa como cinta transportadora de calor hacia latitudes y regiones como las del Reino Unido y Escandinavia. Por pequeño que nos parezca un cambio ambiental (e.g., unos grados más de temperatura media, un ligero cambio en el volumen de agua embalsada, un cambio moderado en el albedo o reflexión de la luz solar por cambios en el uso del suelo) puede no serlo en la práctica y es preciso estimar y valorar correctamente los efectos en cascada que puedan derivarse y que con frecuencia amplifican el impacto de este cambio ambiental en apariencia modesto.

Incremento de temperatura (°C) y disminución de la precipitación (mm día⁻¹) durante el verano según previsiones para el último tercio del siglo XXI

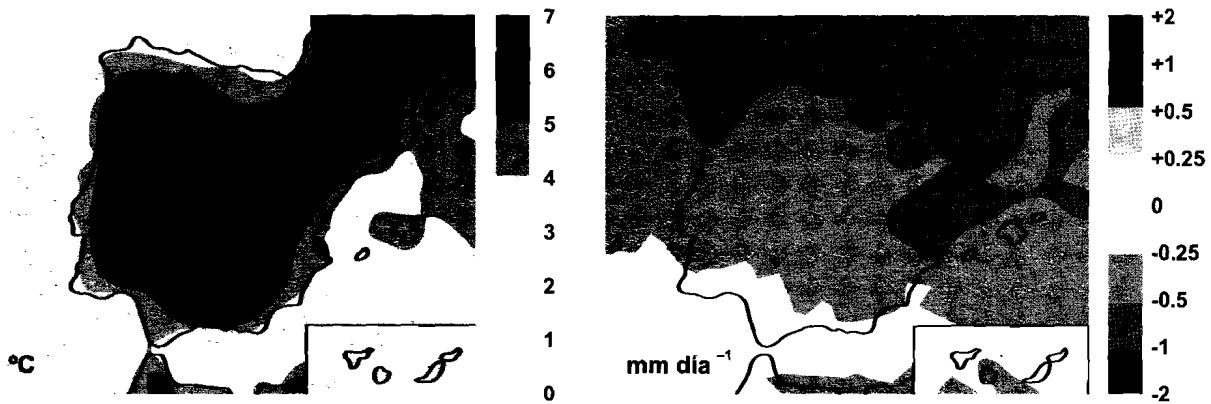


Figura 1. Escenarios de temperatura y precipitación en España para el último tercio del siglo XXI. Simulaciones realizadas bajo un escenario de emisiones elevadas de CO₂ (escenario A2) a partir del período de referencia 1961-1990 por el Grupo de Modelización Numérica para el Medio Ambiente y el Clima, UCLM, Toledo (Castro et al. 2004)

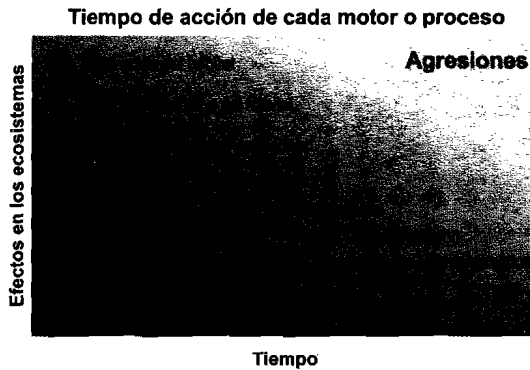


Figura 2. Tiempo de acción de cada motor o proceso de cambio en los ecosistemas. Estos procesos pueden ser negativos (agresiones) o positivos (medidas correctoras) y todos difieren en el tiempo que transcurre hasta que sus efectos son apreciables.

A pesar de la creciente importancia del cambio climático, éste no es ni el único ni necesariamente el motor más importante de cambio de los ecosistemas. Las dos características más importantes de los motores o procesos implicados en el cambio global son su efecto neto sobre los ecosistemas, es decir, su impacto, y el tiempo de acción, es decir, el tiempo que transcurre hasta que ese impacto es perceptible. De esta forma, tanto las agresiones que el ser humano realiza como las medidas correctoras que aplica a los ecosistemas pueden ordenarse en un gráfico que contemple ambos parámetros (fi-

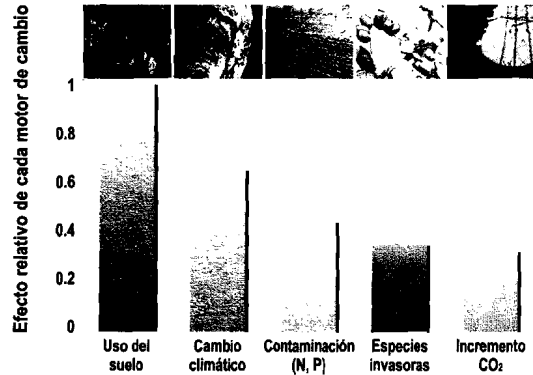


Figura 3. Efecto relativo de los cinco motores principales del cambio global sobre la biodiversidad general del Planeta. El cambio de uso del territorio es el motor de cambio con un efecto más importante. Elaborado a partir de Chapin III et al. (2001).

gura 2). Los efectos del cambio climático son en general menores y se perciben más tarde que los derivados de la fragmentación del hábitat o de la contaminación, aunque la importancia del cambio climático va siendo progresivamente mayor. Actualmente se considera que existen cinco motores principales de cambio, siendo el cambio de uso del territorio y el cambio climático los que mayor impacto tienen sobre la biodiversidad a nivel global (figura 3). Lógicamente, la importancia relativa de estos motores de cambio varía con el ecosistema, y así, mientras en ciertas zonas mediterráneas las es-

Efecto sobre la biodiversidad

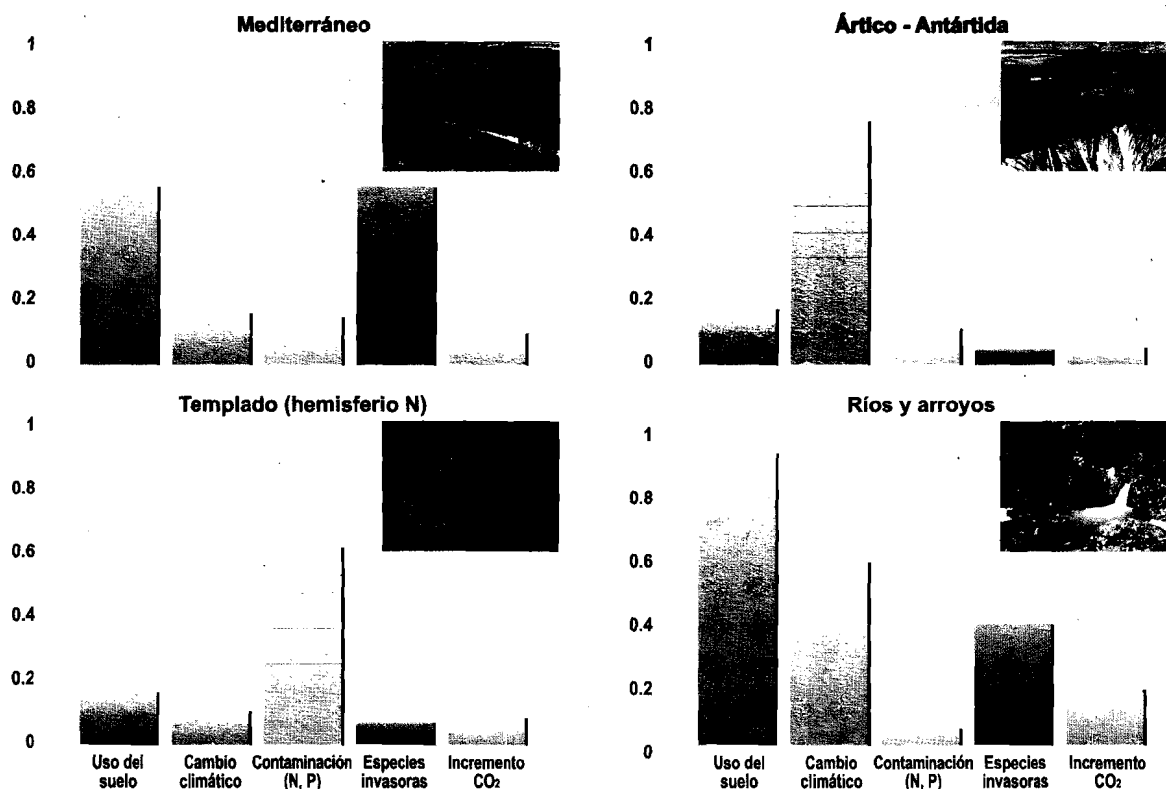


Figura 4. Efecto relativo de los cinco motores principales del cambio global sobre la biodiversidad en cuatro ecosistemas o regiones biogeográficas importantes. La importancia relativa de cada motor de cambio varía con el tipo de sistema. Elaborado a partir de Chapin III et al. (2001).

pecies exóticas naturalizadas y de carácter invasor son la principal amenaza para la biodiversidad, los cambios de uso lo son en ríos y lagos, la contaminación por compuestos de nitrógeno y fósforo lo son en los ecosistemas templados del hemisferio norte y el cambio climático es el principal motor de cambio en zonas polares y subpolares de ambos hemisferios (figura 4).

Así pues, el cambio climático está en el núcleo de la mayoría de los cambios ambientales que percibimos actualmente, pero no actúa sólo y, en ciertos ecosistemas, no es el principal motor del cambio. En general resulta difícil separar totalmente los efectos debidos a varios motores de cambio, y 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 impacto es rara vez atribuible en exclusividad a uno de ellos (Valladares et al. 2004a).

Qué sabemos del cambio global

Si bien actualmente existe mucha información sobre diversos aspectos ambientales que están cambiando, las primeras incertidumbres nacen de la forma de detectar estos cambios (figura 5). La detección del cambio global en sí mismo no es tan crítica como la detección de sus efectos, a lo cual dedicaremos buena parte de este escrito. La determinación de los efectos del cambio global requiere de la identificación de indicadores, y el problema es primero encontrarlos, y después estar seguros de que indican lo que necesitamos que indiquen. Por ejemplo, la biodiversidad se emplea como indicador de los efectos del cambio global en los ecosistemas. Pero si sólo se anota el número total de especies, se puede llegar a situaciones en las que el indicador no señala ningún cambio significativo cuando las especies nativas han sido reempla-

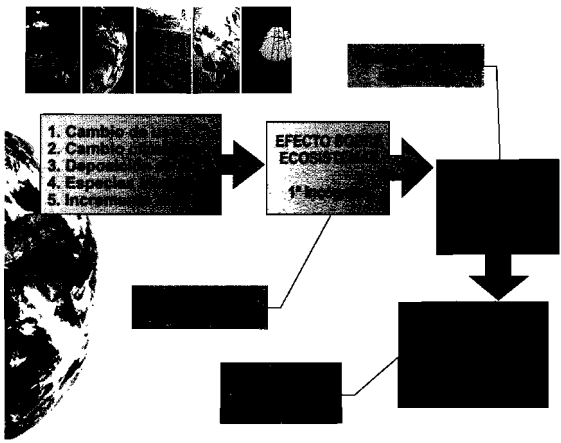


Figura 5. Cascada de incertidumbres sobre los motores de cambio, su efecto en los ecosistemas y las estrategias posibles de mitigación de los impactos y de recuperación o restauración ecológica. En cada paso, la resolución de las incógnitas requiere de un tipo de acción diferente, pasando de la búsqueda de indicadores de cambio a la integración de disciplinas científicas y tecnológicas.

zadas por especies exóticas. Y es evidente que el funcionamiento de ecosistemas con este tipo de cambio en la composición de especies sería muy diferente. Por ello es preferible emplear indicadores basados en la función más que en la estructura o composición de los ecosistemas. Pero determinar la función es un proceso complejo y caro, por lo que no es posible hacerlo en muchos sitios a la vez y durante mucho tiempo. Las siguientes incertidumbres sobre el cambio global se originan al plantear escenarios futuros y calcular su probabilidad y los cambios ambientales asociados para poder anticiparse y evitar los escenarios menos deseables. Para ello es imprescindible la integración entre disciplinas. Y finalmente, otro grupo de incertidumbres surge cuando se buscan soluciones o se pretenden mitigar los efectos del cambio global. Aquí la integración no es sólo entre disciplinas científicas sino entre ciencia y tecnología, y este dueto debe estar en directa sintonía con las necesidades y posibilidades socioeconómicas de cada región.

Existen, por tanto, numerosas incertidumbres en relación al cambio global, las cuales hacen que se hable necesariamente en términos probabilísticos y no determinísticos. Pero aunque haya lagunas de conocimiento y discrepancias entre científicos, existe información precisa para apoyar de forma sólida y concluyente que las cosas cambian. Y en

buena parte, estos cambios son debidos a las actividades humanas. Para un resumen revelador de los cambios acontecidos en el último siglo y medio es muy recomendable la lectura de la llamada revisión del milenio (Millenium Assessment 2005) apoyada por las Naciones Unidas. Entre los múltiples datos que allí podemos encontrar, pueden bastar para ilustrar la dimensión y velocidad del cambio global los siguientes cuatro ejemplos, que son promedios a nivel de todo el planeta:

1. Se ha transformado más superficie en tierra de cultivo desde 1945 que durante los siglos XVIII y XIX juntos.
2. El 25% de los corales del mundo han sido severamente dañados o se han perdido en las tres últimas décadas.
3. El 35% de la superficie ocupada por manglares se ha perdido en las tres últimas décadas.
4. La cantidad de agua acumulada en embalses se ha cuadruplicado desde 1960. Sin embargo, el agua extraída de ríos y lagos se ha duplicado desde 1960.

De los cinco motores del cambio global, el cambio climático es el que está generando mayor preocupación y más esfuerzos de investigación. Los análisis climáticos revelan cambios significativos a niveles tanto globales como locales. Los informes del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC 2001) y el informe de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA 2004), así como los informes nacionales (Ministerio de Medio Ambiente 2004) y autonómicos (Generalitat de Catalunya 2005), no dejan lugar a dudas: la tierra se calienta, y este calentamiento es atribuible a la emisión de gases con efecto invernadero. Se ha pasado de una concentración atmosférica de CO₂ de 280 ppm (partes por millón) a las 375 ppm de 2003, el nivel más alto en los últimos 500.000 años. En los últimos cien años, la temperatura global del aire de la Tierra ha subido 0,7 °C y en Europa este valor es de 0,95 °C. Como consecuencia de ello, los glaciares, la cobertura nival y la extensión de los mares helados esta disminuyendo con rapidez. Entre 1850 y 1980 los glaciares de los Alpes se han reducido a un tercio de su superficie inicial. El nivel del

mar en Europa está subiendo entre 0,8 y 3 mm al año, dependiendo de la cuenca y del mar en concreto, y se espera que esta tasa de elevación se multiplique al menos por dos durante el siglo XXI. En las últimas décadas, las regiones de Europa septentrional y central han recibido más lluvia de lo habitual, mientras que en el sur y sureste de Europa la lluvia ha sido significativamente más escasa. Además, se ha incrementado la frecuencia e intensidad de los eventos extremos (inundaciones, sequías y olas de calor y de frío).

Durante el siglo XX, y particularmente desde la década de los 70 de ese siglo, las temperaturas en España han aumentado de forma general, con una magnitud algo superior a la media global del planeta (Castro et al. 2004). Este aumento ha sido más acusado en invierno. Las precipitaciones durante este período han tendido a disminuir, sobre todo en la parte meridional y Canarias, lo cual se corresponde con un aumento en el índice de la NAO (Oscilación del Atlántico Norte). No obstante, es preciso manejar esta información con precaución dada la alta variabilidad de la precipitación en España. Y esta variabilidad no sólo en la precipitación sino en todos los rasgos del clima se prevé que se incremente, sobre todo para períodos cortos de tiempo. El índice de la NAO se volverá más profundo y variable aunque es incierto cómo esto afectará a regiones como Cataluña que quedan a sotavento de la Península Ibérica (Llebot et al. 2005).

Estamos, además, viviendo lo que se denomina un oscurecimiento global, de forma que la radiación que llega a los ecosistemas es un 3% menos cada década debido a una combinación de factores (contaminación, aerosoles, nubosidad). El 86% de las estaciones meteorológicas del mundo muestran un incremento de la nubosidad, y la cobertura de nubes ha aumentado en un 10% en Estados Unidos de América y un 5% en Europa (Valladares et al. 2004b). Aunque esta nubosidad no significa necesariamente más lluvia, sus efectos sobre el balance radiativo del planeta y sobre la actividad de la biosfera son muy importantes. Una vez más, los científicos discrepan en los detalles, ya que mientras unos enfatizan los aspectos perjudiciales de este oscurecimiento, otros destacan ciertos aspectos po-

sitivos: al disminuir la radiación que llega a la superficie de la Tierra, el calentamiento global podría verse ligeramente compensado y en ciertas zonas áridas la eficiencia de la fotosíntesis podría aumentar. El que no haya consenso en los detalles no significa que la información disponible impida afirmar la existencia de un profundo cambio global de importantes repercusiones para los sistemas naturales y para la especie humana.

Qué sabemos de los impactos del cambio global

En la actualidad se tiene información abundante sobre un gran número de cambios ambientales que se pueden atribuir a cada uno de los principales motores de cambio. La fragmentación del 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. 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. Además, 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. Con algo más de detalle, podemos considerar a continuación lo que se va sabiendo de los impactos del cambio climático en Europa, a partir del informe que la Agencia Europea del Medio Ambiente publicó en 2004.

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. El calentamiento global ha incrementado en 10 días la duración promedio de la estación de crecimiento entre 1962 y 1995. En apo-

yo de esta tendencia, la medida del verdor de los ecosistemas mediante imágenes de satélite (una estimación comprobada de la productividad vegetal) se ha incrementado en un 12% durante este período. 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 2004, Valladares et al. 2004a). 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. Muchas especies endémicas de alta montaña se encuentran amenazadas por la migración altitudinal de arbustos y especies más competitivas propias 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 período 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. 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. 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 (ver más adelante).

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 incrementándose en paralelo al aumento previsto de las temperaturas, pero el efecto neto de esta mayor supervivencia sobre las poblaciones de aves no se sabe con certeza. Se han observado cambios significativos en las fechas de llegada y salida de las aves migratorias.

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 el verano de 2003 parecen apoyar esta tendencia.

El aumento de temperatura tiene diversos efectos directos sobre la actividad de los organismos vivos. Uno importante ambientalmente 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 del aire. Las emisiones de VOC suponen un campo emergente de investigación ya que no sólo los efectos que sobre su emisión ejerce el cambio climático demandan más atención, sino que periódicamente se encuentran nuevas y fascinantes funciones ecológicas de los VOCs, indicando que nuestra comprensión de los mismos es aún fragmentaria.

La información disponible para ciertos ecosistemas ibéricos, como el bosque y el matorral mediterráneo, empieza a ser importante. No obstante, persisten numerosos interrogantes, sobre todo en lo referente a cuál es la gestión más adecuada de estos ecosistemas en el contexto del cambio global (Valladares 2004).

Qué no sabemos: incertidumbres básicas

Existen cuatro grupos de incertidumbres básicas respecto al cambio global y que representan en la actualidad líneas prioritarias de investigación:

1. El propio cambio global, su tasa de cambio, y en el caso del cambio climático, su dimensión real a escala regional y local. El clima resulta aún difícil de abordar y predecir con precisión a nivel local. En particular, existe gran disparidad entre las estimas sobre la tendencia en las precipitaciones locales, ya que éstas se ven muy afectadas por la topografía y procesos locales que resultan aún difíciles de integrar en los modelos generales de clima.

2. La importancia relativa de los motores de cambio y las interacciones entre estos motores. Es imprescindible saber qué motor de cambio predomina en cada ecosistema y región del planeta, pero esto no resulta fácil de determinar, ya que los efectos son difíciles de atribuir a un único motor y los factores interaccionan significativamente entre sí. Por ejemplo, con el abandono del campo y el oscurecimiento general de la atmósfera por el incremento de aerosoles y nubosidad, cada vez hay menos luz disponible para la regeneración y crecimiento de las plantas. La combinación de este oscurecimiento global con el incremento de la sequía previsto en diversos escenarios de cambio climático, da lugar a una frecuencia creciente de sombras secas que imponen una doble limitación a la regeneración de muchas especies vegetales y sobre lo cual aún sabemos muy poco.

3. Los efectos del cambio global sobre procesos y ciclos biogeoquímicos. El balance de carbono de los ecosistemas es el resultado de procesos que capturan el CO_2 atmosférico (e.g., fotosíntesis) y procesos que liberan CO_2 (e.g., respiración, incendios). Un aspecto crucial en la actualidad es determinar hasta qué punto los ecosistemas terrestres pueden actuar como sumideros de carbono y atenuar así el calentamiento global. Pero cerrar el balance de carbono al detalle no es una tarea fácil, ya que intervienen en el análisis escalas de tiempo y espacio muy diferentes.

Aunque existe cada vez más información sobre el ciclo del carbono, debido en buena medida a los intereses en calcular el balance global y regional de carbono y estimar así las cuotas de emisión de CO_2 que cada país puede permitirse (ver apartado sobre el protocolo de Kioto más adelante), este elemento no está solo sino que forma parte de procesos más complejos que incluyen toda una gama de elementos y compuestos. En el caso de zonas secas existe, por ejemplo, una gran incertidumbre respecto al efecto final del cambio climático sobre la mineralización de la materia orgánica y la productividad vegetal, ya que mientras la temperatura las incrementa, la sequía las disminuye.

4. Los efectos del cambio global sobre especies individuales y tiempos de reacción de las especies.

La información disponible es muy incompleta y para muchas especies lo único que se puede obtener es una estimación teórica de su capacidad de respuesta ante ciertos aspectos del cambio global. Pero hace falta información más precisa, experimental siempre que sea posible, sobre el efecto de los motores principales del cambio global sobre las especies más representativas. Desde un punto de vista evolutivo, las especies tienden a hacerse conservadoras y a responder a las perturbaciones más con la migración que con la adaptación. Pero la migración en el paisaje fragmentado de la actualidad es poco probable. La lentitud de muchos procesos ecológicos compromete la viabilidad a largo plazo del ecosistema ya que una de las características del cambio climático es la aceleración de la tasas de cambio. Los procesos microevolutivos pueden darse en plazos de tiempo cortos en sistemas muy dinámicos como las lagunas temporales y compensar así los efectos negativos de una tasa de cambio ambiental muy rápida. Pero estos procesos no son operativos para especies longevas y de lento crecimiento como encinas y robles, esenciales en muchos de nuestros ecosistemas terrestres. La capacidad de adaptación ecofisiológica a las condiciones ambientales locales es notable en la mayoría de las especies tanto vegetales como animales, pero el problema es la rápida tasa de cambio ambiental. Este problema es evidente sobre todo para especies leñosas donde los ajustes evolutivos pueden requerir de 200 a 1.200 años para ser efectivos, como ha sido estimado en *Pinus contorta*. Si las plantas no pueden seguir el cambio climático por evolución, pueden atenuar los efectos adversos de éste mediante respuestas a corto plazo (aclimatación, plasticidad fenotípica). Pero la plasticidad no ha sido en general maximizada durante la evolución en sistemas adversos (e.g., zonas áridas o pobres en nutrientes o sometidas a extremos climáticos) sino que las especies de estas zonas tienden a realizar un uso conservativo de los recursos que implica una plasticidad moderada.

El resultado final sobre el tiempo de reacción de las especies, ya sea por evolución (microevolución) o por plasticidad fenotípica, es por tanto incierto para muchas especies.

Qué no sabemos: incertidumbres complejas

Si como hemos visto existen incertidumbres básicas sobre el efecto del cambio global en especies clave de nuestros ecosistemas, hay que tener en cuenta que estas incertidumbres crecen con la complejidad de los procesos y de los ecosistemas. Los efectos de los motores del cambio global pueden ser directos o indirectos, y lo habitual es que ambos tipos de efecto tengan lugar a la vez. La correcta estimación de los efectos indirectos es mucho más compleja que la de los efectos directos, y esta complejidad aumenta si en lugar de los efectos indirectos sobre una determinada especie lo que pretendemos saber son los efectos indirectos sobre las interacciones entre especies (figura 6). Por ejemplo, se ha visto que el incremento de temperatura hace que especies tanto de animales como de plantas se vayan encontrando cada vez a altitudes o latitudes mayores. De esta forma, un efecto directo del cambio climático es la migración altitudinal del haya observada en el macizo del Montseny (Peñuelas y Boada 2003) o de la oruga de la procesionaria del pino observada en Sierra Nevada (Hodar et al. 2004). Como hemos visto, otro efecto directo del incremento de temperatura es el adelanto en la floración y producción de hojas, y en los ciclos vitales de los insectos que se alimentan de estas flores y hojas.

Los efectos indirectos de este cambio térmico son muchos y complejos. Por ejemplo, las aves migratorias que llegan a una zona en una determinada fecha se encuentran con cambios en su fuente de alimento ya que las plantas o insectos de los que se alimentan están en una fase de su ciclo vital diferente a la que el ave espera encontrarse.

Este desfase entre la llegada de las aves migratorias y su fuente de alimentación da lugar a una disminución en la eficacia reproductora de las aves (Sanz et al. 2003). Otro ejemplo de efecto indirecto del cambio climático sobre las interacciones entre especies lo encontramos en las masas naturales de pino silvestre de Sierra Nevada. Estas masas forestales se enfrentan a la amenaza de la procesionaria, una amenaza nueva que viene de la mano del cambio climático ya que es el motor de cambio

Tipos de efectos del cambio global

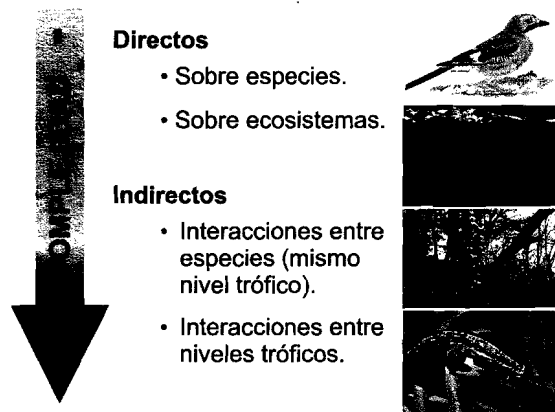


Figura 6. Los efectos del cambio global se vuelven más complejos y por tanto más difíciles de comprender y anticipar a medida que pasan de ser directos a indirectos o de afectar a una especie o a todo un sistema de especies que interaccionan entre sí. En realidad, el cambio global afecta a todo el sistema y tiene efectos tanto directos como indirectos, pero por razones prácticas con frecuencia resulta operativo trabajar a distintos niveles de complejidad y realismo.

que permite una coexistencia entre estos pinos y esta plaga que antes no se daba.

Los motores del cambio global operan simultáneamente sobre los ecosistemas y sus efectos conjuntos pueden ser aditivos, sinérgicos (cuando los efectos son mayores que la simple suma de efectos separados) o antagónicos cuando los efectos de los varios motores tienden a anularse mutuamente. Los motores de cambio interaccionan de forma compleja entre sí (figura 7) y sus efectos son difíciles de separar. Por ejemplo, en el caso de la migración altitudinal de las hayas en el macizo del Montseny, no es factible separar el efecto debido al calentamiento global, que ha permitido a las hayas ocupar zonas más altas y ha hecho que sean más escasas en las zonas bajas, del efecto debido a los cambios de uso acaecidos durante las últimas décadas, en las que se han abandonado ciertas prácticas ganaderas y forestales y se han tomado medidas de conservación y protección que han cambiado el patrón de regeneración del haya en la zona. En algunos casos, la interacción a tres o más bandas entre motores de cambio hace de la comprensión de los procesos todo un desafío científico. Por ejemplo, ciertas especies vegetales introducidas inadvertidamente se han convertido en plantas inva-

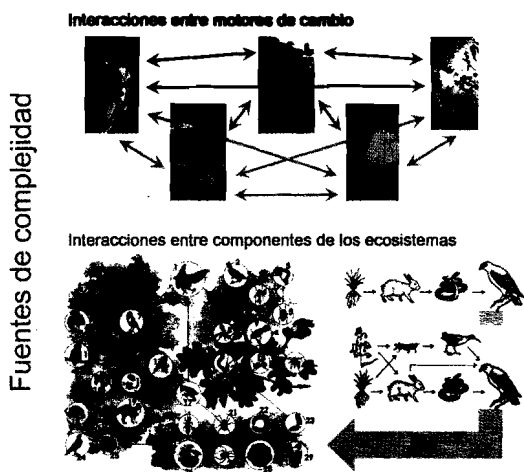


Figura 7. Las interacciones se dan tanto entre los distintos motores del cambio global como entre los componentes de cada ecosistema. Esto da lugar a un complejo entramado de procesos que adquiere aún mayor complejidad si se incorporan también todas las interacciones entre motores y componentes de los sistemas. No obstante, no todos los sistemas son complejos ni en todos los casos se dan todas las interacciones posibles con intensidad significativa. Pero es preciso tener en cuenta este escenario de interacciones para analizar de forma realista los procesos implicados en el cambio global y poder estimar con cierta precisión los efectos del cambio en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, así como en los bienes y servicios que nos brindan.

soras que alteran la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas forestales. En muchos bosques templados operan simultáneamente otros motores de cambio como el calentamiento global y la contaminación por productos fertilizantes nitrogenados, y resulta muy difícil atribuir la pérdida de funcionalidad de estos ecosistemas a la presencia de las plantas invasoras, al cambio térmico o a la contaminación con nitrógeno. Todo apunta a que el impacto de las especies invasoras se ve aumentado por los demás cambios ambientales de forma sinérgica.

Numerosas investigaciones han demostrado que pequeños cambios en el número de especies que forman una red trófica tienen una gran influencia en la estructura de la comunidad y en los procesos de los ecosistemas. Más recientemente se ha visto que, en el contexto del cambio global, tan o más importante que el número de especies, y por tanto el número de interacciones y nodos en una red trófica, es la fuerza o intensidad de cada interacción entre especies.

Esta intensidad de la interacción representa la transferencia de energía a través del ecosistema y abarca desde tasas de alimentación hasta eficiencias de asimilación. La intensidad de la interacción entre especies es clave porque está ligada a la estabilidad del sistema y responde de forma muy pronunciada a los distintos motores del cambio global (Emmerson et al. 2005). Pero resulta más fácil determinar el número de especies e interacciones que se dan en un ecosistema que la intensidad de estas interacciones, por lo que nuestro conocimiento al respecto es limitado.

Otro aspecto del que sabemos poco es el de los efectos en sentido contrario (retroalimentaciones o *feedbacks* en inglés), es decir la reacción de los ecosistemas que afecta al propio motor de cambio. Es evidente que el cambio climático afecta a los ecosistemas, pero éstos a su vez afectan al clima. Y el balance final no es fácil de estimar. Por ejemplo, los bosques de las sierras costeras del litoral mediterráneo español son eficientes nucleadores de tormentas que pueden contrarrestar la tendencia a una disminución de las precipitaciones en el área. En general, se estima que el calentamiento global incrementará la aridez en sistemas donde el agua es limitante mediante la aceleración de la evapotranspiración. Sin embargo, un estudio en las praderas bajo clima mediterráneo seco de California ha mostrado cómo la interacción entre el calentamiento y la vegetación dominante en estas praderas da lugar a la situación contraria: un calentamiento simulado durante dos años dio como resultado más humedad en el suelo, debido a la senescencia temprana de la vegetación y por tanto a un patrón de ahorro hídrico en condiciones de cambio climático (Zavaleta et al. 2003).

En el mundo actual y salvo en contadas ocasiones, la intervención humana en los sistemas naturales suele ser sinónimo de deterioro ambiental. Estas intervenciones han sido especialmente negativas en sistemas complejos donde múltiples factores y especies coexisten e interaccionan. La introducción en Australia primero del conejo como fuente de alimento, luego del zorro y finalmente de la mixomatosis para controlar el desmedido crecimiento demográfico del herbívoro es un caso ejem-

Efectos del cambio climático sobre la interacción lobos-carroñeros

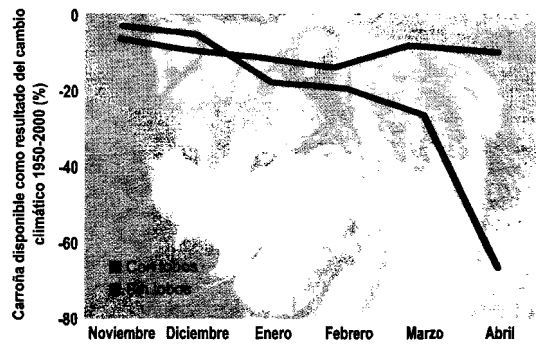


Figura 8. Efecto del cambio climático sobre la disponibilidad de carroña al final del invierno en dos escenarios, con y sin lobos, en el Parque Nacional de Yellowstone (EE.UU.). Los lobos fueron reintroducidos con éxito en la década de los noventa y atenúan los efectos del cambio climático sobre la comunidad de carroñeros ya que hacen que más carroña esté disponible que la que lo estaría en los inviernos cada vez menos rigurosos y con menos nieve sin su presencia. La presencia del lobo tiene por tanto complejos efectos en la cadena trófica del ecosistema y afecta tanto a su biodiversidad como a su funcionamiento. En este caso, la presencia de este superpredador hace al sistema menos vulnerable a los efectos directos del cambio climático sobre la cubierta nival y la mortandad asociada de ungulados. Elaborado de Wilmers y Getz (2005).

plar de una cadena de infortunios ambientales causados en buena medida por un desconocimiento del funcionamiento integral de los sistemas naturales.

Pero en su esfuerzo por recuperar la funcionalidad de los sistemas en que vive, la especie humana a veces acierta. Éste parece ser el caso de la exitosa reintroducción en 1995 del lobo en el Parque Nacional de Yellowstone (USA) y de los beneficiosos efectos de esta reintroducción sobre los impactos del cambio climático. En un análisis del clima y los efectos directos de éste sobre la dinámica de Yellowstone, se observó que el calentamiento general está dando lugar a una significativa disminución de la duración de la cubierta nival en los últimos 55 años. La duración de la nieve está directamente relacionada con la mortandad de los ciervos, que son la fuente principal de carroña en Yellowstone y el sustento de toda una rica fauna de necrófagos y oportunistas que incluye osos, coyotes, águilas, mapaches y diversas especies de cuervos. Con el cambio climático, esta comunidad de carroñeros está sufriendo una importante crisis. Sin embargo, la llegada del lobo ha ido compensando este problema al incrementar la carroña dispo-

nible para otras especies tras sus cacerías (figura 8). La presencia del lobo tiene complejos efectos en la cadena trófica del ecosistema y afecta tanto a su biodiversidad como a su funcionamiento (Wilmers y Getz 2005).

Este estudio indica que la presencia de un superpredador hace al sistema menos vulnerable a los efectos directos del cambio climático sobre la cubierta nival y la mortandad asociada de ungulados. Este estudio sugiere, además, que los sistemas complejos (i.e. compuestos por múltiples especies que interaccionan de múltiples formas entre sí) podrían tener más alternativas para atenuar los efectos negativos de los cambios ambientales de origen humano incluyendo el cambio climático. Pero, en realidad, este estudio revela, por su carácter único, que sabemos muy poco de los impactos en cascada del cambio climático en sistemas complejos y de cómo estos impactos se ven afectados por otros motores de cambio. Por tanto, la mayoría de las actuaciones que podamos hacer para atenuar o contrarrestar los impactos del cambio global siguen teniendo que basar en el ensayo y error o en la intuición más que en la evidencia científica.

Qué podemos hacer: el caso de las emisiones de CO₂ y el protocolo de Kioto

El cambio global es un ejemplo paradigmático de pensar globalmente y actuar localmente. Hasta aquí hemos visto la diversidad de factores y procesos que hay que tener en cuenta para interpretar correctamente qué está pasando en nuestro entorno y comprender hasta qué punto somos responsables, podemos hacer algo y la naturaleza puede o podrá amortiguar o contrarrestar los impactos. Como ciudadanos individuales podemos y debemos tener conciencia de este fenómeno global, y podemos y debemos actuar localmente, ensayando modos de vida más compatibles con la conservación de los sistemas naturales y de los bienes y servicios que nos brindan. Pero también es preciso actuar a nivel global, algo difícil de alcanzar. Para actuar globalmente hay que ponerse de acuerdo entre muchos sectores de la sociedad y entre muchos

países y regiones del planeta, lo cual es todo un desafío para la especie humana, que tradicionalmente ha resuelto los problemas mediante la violencia, estableciendo fronteras y repartiendo desigualmente los recursos. El medio ambiente no reconoce estas fronteras ya que los procesos naturales operan a escalas que trascienden fincas particulares, comunidades autónomas y países.

Las emisiones antropogénicas de CO₂ son las principales responsables de uno de los motores de cambio más importante, el cambio climático. Su regulación es imprescindible para reequilibrar el balance radiativo del planeta. El Protocolo de Kioto es un acuerdo internacional de lucha contra el cambio climático a través de la regulación de estas emisiones, el cual se firmó en diciembre de 1997 en la ciudad japonesa de Kioto.

Cien gobiernos de todo el mundo apoyaron la propuesta del diplomático argentino Raúl Estrada, que entonces presidía el Programa del Clima de las Naciones Unidas (ONU). Con el Protocolo, Estrada respondía al compromiso planteado en la Conferencia de la Tierra de 1992, celebrada en Río de Janeiro, en la que se acordó diseñar un instrumento legal internacional para luchar contra el cambio climático. Las reuniones de Río y Kioto han sido dos esfuerzos por reconocer la gravedad de los cambios ambientales del planeta y la necesidad de unir fuerzas a nivel internacional que no tienen precedentes en la historia de la humanidad. Cabría recordar aquí el dicho de "a grandes males, grandes remedios".

El Protocolo de Kioto entró en vigor el 16 de febrero de 2005 tras unos años de dudas de países estratégicos como Rusia (que finalmente lo apoyó) y Estados Unidos de América (que finalmente no lo apoyó). Las 141 naciones firmantes están ya aplicando medidas para reducir la emisión de los gases contaminantes que causan el calentamiento global. Tras firmarse el protocolo en 1997, el acuerdo necesitaba el apoyo legal de un conjunto de al menos 55 países y entre ellos suficientes países desarrollados cuyas emisiones sumen al menos el 55% del total de dichos países en 1990. Los gases contemplados con aquellos causantes del calentamiento global: dióxido de carbono (CO₂) -el más

importante-, metano, óxido nítrico, hidrofluorocarburos, perfluorocarburos y hexafluoruro de azufre. Los parlamentos nacionales debían aprobar por ley la adhesión al protocolo.

El Protocolo de Kioto obliga a los países desarrollados a alcanzar una reducción mundial de las emisiones del 5,2% entre 2008 y 2012, frente a 1990. Para lograrlo, el Protocolo prevé distintas obligaciones de recorte o aumento de la contaminación, que en conjunto garantizan la reducción del 5,2%. El Protocolo no impone multas, aunque sí castigos. El que no cumpla, tendrá que reducir en el siguiente período la cantidad incumplida multiplicada por 1,3. Además podría ser sancionado a no poder acogerse a algunos de los mecanismos que facilitan la reducción. Desde el principio, la Unión Europea (UE) ha liderado el compromiso para la adopción internacional de Kioto. La ratificación de Kioto por parte de la UE obliga a los Estados miembros a reducir un 8% sus emisiones entre 2008 y 2012, frente a 1990. Bruselas reparte este compromiso entre los países, a través del denominado sistema de burbuja, de forma que unos tienen que recortar sus emisiones y otros (como España) pueden elevarlas pero con un límite. Dentro del mercado de derechos de emisión, existen normas estrictas que llevan aparejadas multas. Las empresas deberán pagar una multa a la UE de 40 euros por tonelada incumplida. En el período de 2008-2012 el precio de la multa será de 100 euros. El Protocolo afecta a todas las empresas de los sectores: eléctrico, papelera, siderúrgica, cementera, refinería de petróleo, fabricantes de vidrio y cerámica e industrias con instalaciones de cogeneración de más de 20 megavatios. España tiene que limitar a un 15% el incremento de sus gases entre 2008 y 2012, respecto a las emisiones de 1990. En 2004 se estima que el aumento era ya del 45%.

La no ratificación de Kioto por parte de EE.UU. fue un severo golpe al acuerdo, puesto que este país significa el 36% del esfuerzo de Kioto. Otros países que siguen a EE.UU. en su negativa a apoyar Kioto son Australia (2,1%), Liechtenstein y Mónaco. La India y China, a pesar de haber ratificado el protocolo de Kioto, han sido excluidos por el momento de tener que asumir compromisos vinculan-

tes de limitación de sus emisiones, debido a su menor nivel de desarrollo. Ambos son potentes emisores: en conjunto, el CO₂ emitido desde sus industrias y resto de actividades constituye la segunda fuente de contaminación del planeta, superada únicamente por Estados Unidos. Pero el Protocolo de Kioto establece en uno de sus principios inspiradores que la mayor parte de responsabilidad del problema recae hasta el momento en los países desarrollados, y por tanto son ellos los que en primer lugar han de dar ejemplo a los demás de cómo pueden recortar emisiones.

En la Conferencia del Clima de Buenos Aires (COP 10) celebrada en diciembre de 2004 se empezó a hablar de la segunda fase de Kioto. Es posible que se relance la discusión sobre los objetivos de Kioto a largo plazo. La UE ya ha empezado a discutir estos compromisos. Nadie se atreve a aventurar cifras. Lo primero sería conseguir atraer a los objetivos de Kioto a EE.UU. Después comprometer a las economías emergentes como China, India o Brasil a que adopten compromisos para períodos posteriores. Y, finalmente, adoptar nuevos compromisos más elevados para los siguientes cinco años. Sin embargo, podrían cambiar los criterios de cómo repartir la carga entre los países, dependiendo de su producto interior bruto, población y consumo, haciendo más equitativa la carga.

Los acuerdos de Kioto son difíciles de poner en práctica. Además, la ciencia indica que por sí solos no serán suficientes para frenar el cambio climático. Pero Kioto es imprescindible y supone, por encima de todo, un esfuerzo realmente global de tomar cartas en un problemático asunto del que somos responsables, nos guste o no.

**Corolario: qué deberíamos saber
y cómo lograrlo**

Siempre que preguntemos a un científico, la respuesta será: debemos saber más. El problema es acertar con la dirección y el planteamiento de la investigación para cubrir las principales lagunas en nuestro saber. Y en el caso del cambio global y sus efectos, el reto es hacerlo a tiempo, ya que la tasa

de cambio ambiental es muy rápida y todo indica que se irá acelerando con el desarrollo de la especie humana y su creciente capacidad de alterar el medio. Como se desprende de este escrito, el realismo en las simulaciones lleva consigo un incremento en la complejidad y por tanto en las incertidumbres científicas. El estudio de sistemas realistas que incluyan diversas especies y motores de cambio que interaccionan entre sí es un requisito indispensable para comprender los verdaderos impactos del cambio global, ya que las especies no están solas y los motores de cambio no actúan por separado. Por complejo que esto sea, por aquí pasa la investigación que debe ser priorizada.

Un concepto clave en la investigación en cambio global es la óptica multidisciplinar, ya que comprender los impactos del cambio global y pretender anticiparlos y atenuarlos requiere de biólogos, químicos, geólogos, matemáticos, socioeconomistas, médicos y toda suerte de ingenieros y técnicos. Integrar estas disciplinas es difícil, pero prácticamente todos los planes de investigación nacionales e internacionales recogen esta necesidad. No obstante, los avances reales en este "diálogo científico entre disciplinas" son lentos y puntuales, por lo que los esfuerzos tanto desde arriba hacia abajo (e.g., políticas científicas) como de abajo hacia arriba (e.g., coordinación entre científicos) deben multiplicarse.

Pero quizá el concepto más importante en la investigación en cambio global es el de largo plazo. A nadie se le escapa la gran variabilidad climática que existe tanto a una escala humana o ecológica (años, décadas), como evolutiva (siglos, milenios) y geológica (millones de años). También es evidente que las presiones socioeconómicas sobre el medio ambiente cambian no sólo con la demografía de la especie humana sino con sus cambios erráticos o coyunturales en el modo de vida, de forma que, en pocos años, los destinos turísticos cambian radicalmente así como las preferencias sobre la vivienda, el consumo de agua o la emisión de CO₂ por habitante, la producción de residuos o la intensidad con la que se reutilizan productos y recursos. Por todo ello, por las grandes oscilaciones en las condiciones ambientales y en las presiones que ejerce el ser humano sobre el medio, es imprescindible

dible contar con **series temporales largas de parámetros climáticos y ambientales**, así como sobre la biodiversidad y los procesos ecológicos. Esta búsqueda, apoyo y coordinación de iniciativas de seguimiento a largo plazo ha inspirado la red norteamericana LTER (del inglés *Long-Term Ecological Research*) que ha dado lugar a la iniciativa europea ALTER-net y que en nuestro país comienza a arrancar con REDOTE, la red española de observaciones temporales de ecosistemas. Estas redes de seguimiento que pueden actuar como sistemas de alerta temprana ante cambios severos en el ambiente (e.g., sequías inusuales, extinciones locales) se apoyan en registros pasados que permiten una extrapolación sólida hacia el futuro. Estos registros pueden ser de unas cuantas décadas para el caso de la mayoría de las medidas instrumentales o bien pueden remontarse a miles o millones de años cuando implican muestras fósiles o análisis químicos o isotópicos que informan de procesos y ambientes que tuvieron lugar en otros períodos geológicos. Con estas series temporales largas que se engranan con seguimientos de variables ecosistémicas a tiempo real, y con una política científica sostenida, iremos estando en mejor situación para abordar las distintas escalas de incertidumbre que rodean al cambio global y a sus efectos. Y sólo de esta forma podremos tomar medidas realmente eficaces.

Agradecimientos

Este capítulo ha sido posible gracias a las enriquecedoras discusiones en el seno de la red temática GLOBIMED (www.globimed.net) y a la comprensión de Lucía, Alba, Elena y Diego por los ratos que no pasamos juntos. La financiación ha sido provista por el proyecto RASINV del Ministerio de Educación y Ciencia (CGL2004-04884-C02-02/BOS).

Bibliografía

Castro, M., Martín-Vide, S. y Alonso, S. 2004. El clima de España: pasado, presente y escenarios de clima para el

- siglo XXI. En *Evaluación de los impactos del cambio climático en España* (Moreno, J.M. Ed.), Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Chapin III, F.S., Sala O.E. y Huber-Sanwald, E. 2001. *Global biodiversity in a changing environment: scenarios for the 21st century*. Springer Verlag, New York.
- Emmerson, M., Bezemer, M., Hunter, M.D. y Jones, T.H. 2005. Global change alters the stability of food webs. *Global Change Biology* 11: 490-501.
- Hodar, J.A., Zamora, R. y Peñuelas, J. 2004. El efecto del cambio global en las interacciones planta-animal. En *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante* (Valladares, F. Coord.), Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, pp 462-478.
- Llebot, J.E., Sánchez, J.J., Queralt, A., Rodó, J. y Roca, J. 2005. *Informe del cambio climático en Cataluña: resumen ejecutivo*. Generalitat de Catalunya, Barcelona.
- Peñuelas, J. y Boada, M. 2003. A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Global Change Biology* 9: 131-140.
- Sanz, J.J., Potti, J., Moreno, J., Merino, S. y Frias, O. 2003. Climate change and fitness components of a migratory bird breeding in the Mediterranean region. *Global Change Biology* 9: 1-12.
- Valladares, F. (Coord.). 2004. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Madrid, Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente.
- Valladares, F., Aranda, I. y Sánchez-Gómez, D. 2004b. La luz como factor ecológico y evolutivo para las plantas y su interacción con el agua. En *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante* (Valladares, F. Ed.), Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, pp 335-370.
- Valladares, F., Peñuelas, J. y Calabuig, E.L. 2004a. Ecosistemas terrestres. En *Evaluación de los impactos del cambio climático en España* (Moreno, J.M. Ed.), Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Wilmers, C.C. y Getz, W.M. 2005. Gray wolves as climate change buffers in Yellowstone. *PLoS Biology* 3: 92.
- Zavaleta, E.S., Thomas, B.D., Chiariello, N.R., Asner, G.P., Shaw, M.R. y Field, C.B. 2003. Plants reverse warming effect on ecosystem water balance. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 100: 9892-9893.