



Fue uno de los experimentos más espectaculares de todos los tiempos: en septiembre de 1991, cuatro mujeres y cuatro hombres se confinaron a un ecosistema gigante construido por la mano del hombre. Sobre una superficie de apenas dos canchas de fútbol, este ecosistema comprendía una selva, un desierto, una sabana, un pantano, un océano, campos de cultivo y un sector destinado a vivienda para los científicos. Cúpulas futuristas de vidrio de hasta 23 metros de altura y una

principios biológicos, geocientíficos, físico-químicos y socioeconómicos. También investigan dónde y en qué medida se acumulan estos elementos y qué mecanismos controlan su flujo entre las diversas áreas. Finalmente, los numerosos resultados que se obtienen al practicar investigación al aire libre se utilizan para establecer modelos de cálculo altamente complejos que simulan los procesos terrestres y buscan suministrar respuestas a las preguntas más acuciantes: ¿en qué medida →

Buscado: el elemento número 6

Porqué los investigadores buscan carbono

estructura de acero de varios centímetros de espesor ancladas al suelo aislaban la llamada BIOSFERA II del resto del mundo. El objetivo de los investigadores era vivir durante dos años en el ecosistema artificial, sin abastecimiento externo de aire, ni de alimentos. Pero la naturaleza les jugó una mala pasada.

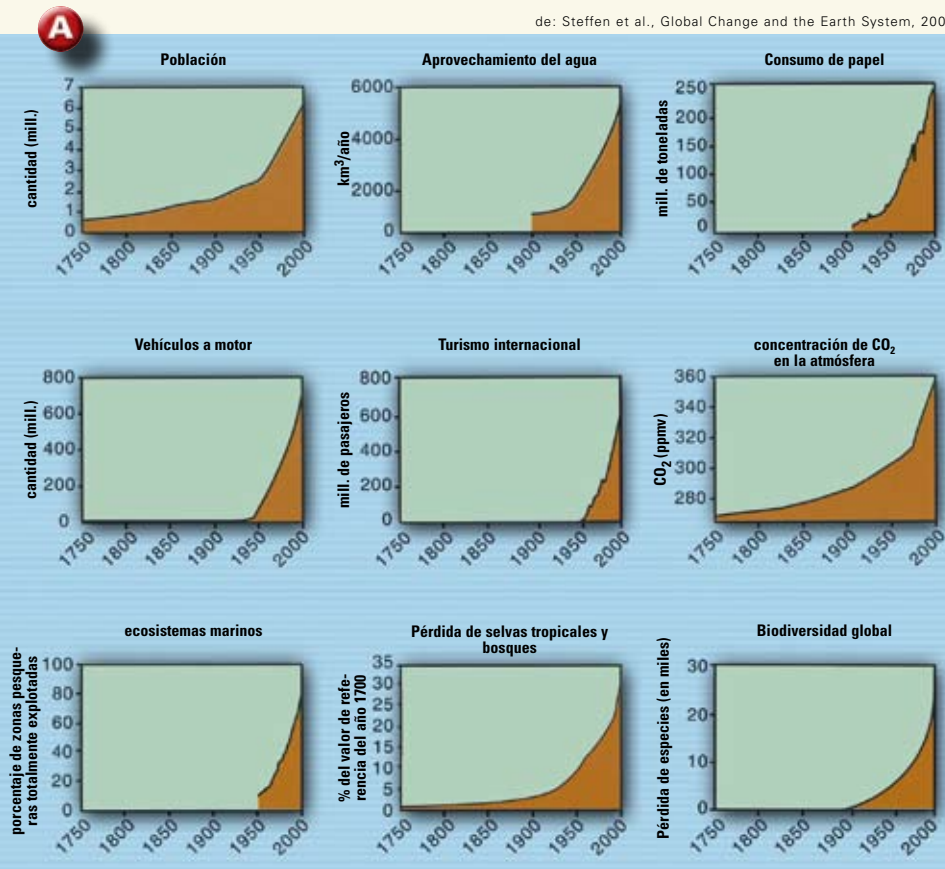
Contrariamente a lo previsto por sus cálculos, unas pocas semanas después, en la BIOSFERA II ya no quedaba suficiente oxígeno. Para que los ocho científicos pudieran sobrevivir, se debió inyectar este gas vital con la ayuda de bombas. Aún así fue muriendo gran parte de los insectos, las aves, los batracios y muchos otros animales y plantas. Las hormigas y las plantas trepadoras, por el contrario, se volvieron una plaga. Dos años después, los integrantes del equipo abandonaron la cúpula de vidrio, agotados y enemistados. El experimento que costó 200 millones de dólares había fracasado; los científicos no lograron reconstruir la versión en miniatura de la Tierra. El fracaso se atribuye a que hasta la fecha muchas interacciones naturales y **ciclos** vitales como los del oxígeno o del **carbono** no se han investigado lo suficiente.

EL FACTOR HUMANO

En el Instituto Max-Planck de Biogeoquímica de la ciudad de Jena, los científicos estudian los complejos movimientos cíclicos de las sustancias que se generan en el suelo, en la atmósfera y en los mares, interrelacionando



◀ Trabajos de montaje en una torre de medición en Turingia, Alemania.



▲ Por medio de las actividades agropecuarias, la producción industrial, el transporte y el turismo, el hombre interviene en los ciclos globales de los elementos y –en diversa medida– hace uso de los recursos naturales.

→ influye el hombre en los ciclos naturales de generación de elementos y qué consecuencias tiene su intervención?

Dos parámetros pueden considerarse característicos del impacto de la actividad humana. Por un lado tenemos la población en permanente crecimiento que ya ha superado la cifra de seis mil millones. Por el otro, incide el consumo de los recursos naturales (Fig. A). Cerca del 50 % de la superficie terrestre ha sido modificada por el hombre con consecuencias significativas para la vegetación y la biodiversidad, la estructura y biología del suelo, sin olvidar el clima. Más de la mitad del agua dulce del planeta se utiliza para consumo humano. Hoy, la fijación industrial del nitrógeno (N₂) excede la fijación natural del N₂. Y se incrementa la concentración de los gases que influyen en el clima. Desde el inicio de la industrialización, la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera ha aumentado un tercio. Grandes cantidades de CO₂ se forman, en especial, por combustión del petróleo, del gas y del carbón - y todos ellos contienen carbono.

La temperatura media de la Tierra sería realmente de sólo -18° C, si el vapor de agua, el

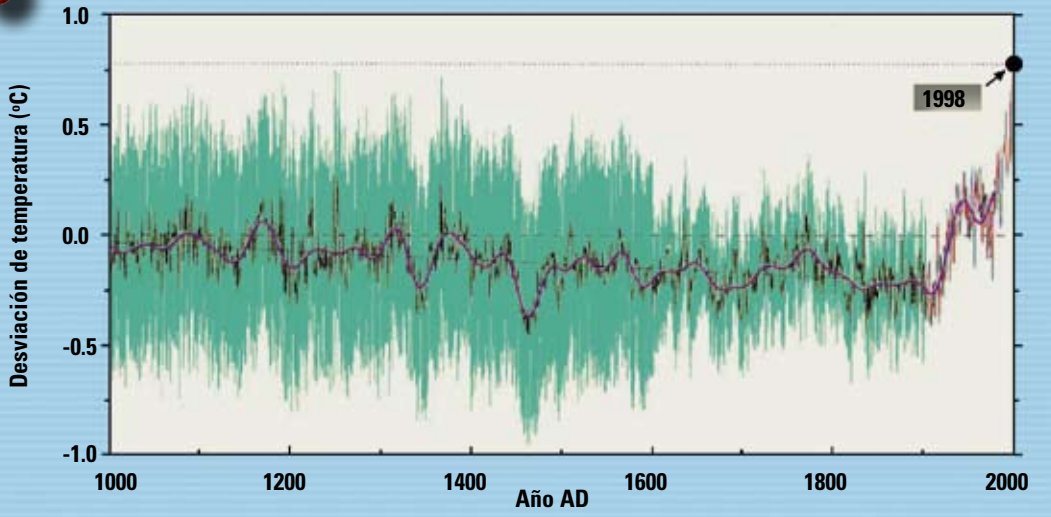
dióxido de carbono y los gases traza de la troposfera no absorbiesen parte de la radiación térmica que emite el suelo y la volvieran a reflejar. Los científicos definen este fenómeno como **efecto invernadero natural**, porque la capa de gases de efecto invernadero atrapa la energía solar, como si fuera un sistema de vidrios planos. La capa permite que la luz solar pase y que la radiación infrarroja, es decir la radiación térmica, sea retenida. A medida que aumenta la cantidad de gases de efecto invernadero, menos energía fluye de la Tierra al espacio en forma de radiación térmica. El fenómeno produce un aumento de la temperatura del suelo y de la capa inferior de la atmósfera. En la actualidad, la temperatura media global ya es 0,6° C superior a la del siglo XIX (Fig. B). En este **efecto invernadero antropógeno**, es decir ocasionado por el hombre, el CO₂ participa con aproximadamente el 60%; lo siguen el metano con el 20%, los hidrocarburos halogenados con el 15% y el óxido nitroso con el 5%.

EL CLIMA EN PELIGRO

Según los cálculos de los investigadores del clima, si las emisiones de dióxido de carbono continuaran aumentando, provocarían un incremento máximo de 2,5° C de la tempera-

tura media terrestre desde el presente hasta el 2050; con terribles consecuencias para el ciclo del agua y el clima en determinadas regiones. Podría producirse el deshielo de los glaciares y aumentar el nivel de los mares; inundaciones y fuertes tormentas devastarían amplias franjas de superficie terrestre. Por eso, en 1997 los estados industrializados se comprometieron en un congreso realizado en Kyoto, Japón, a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Entre 2008 y 2012, las emisiones de CO₂ se tendrán que reducir en aproximadamente el cinco por ciento por debajo del valor de 1990. De acuerdo con esta pauta, los EE.UU. deberán reducir la emisión de gases invernadero un siete por ciento y la Unión Europea (UE) por su parte un ocho por ciento. Dentro de la UE, Alemania pretende reducir las emisiones en un 21%. Pero el acuerdo recién entrará en vigor, cuando lo ratifiquen 55 naciones que en 1990 eran responsables, en conjunto, de por lo menos el 55% del CO₂ emitido por los países industrializados. Si bien los EE.UU. firmaron el **Protocolo de Kyoto** durante la presidencia de Bill Clinton, finalmente no lo ratificaron. Fue revocado por George W. Bush en 2001. A fines de 2003, 120 países (dos tercios de la población mundial) habían ratificado el Protocolo, pero la suma de sus emisiones equivalían sólo al 44,2%. Por eso, la aprobación de Rusia en octubre de 2004 fue decisiva, ya que en este país recaía el 18% de las emisiones de gases invernadero de los países industrializados. Con lo cual, éstos representan ahora el 62% del total de las emisiones. Después del cierre de gran número de establecimientos industriales de la era soviética, actualmente Rusia está muy por debajo del 18% y pasó a estar en la cómoda posición de poder vender certificados de emisión a futuro. Según las estimaciones de una consultora noruega, hasta 2012 el país podría hacer un negocio multimillonario con el **comercio de cuotas de emisiones**.

El Protocolo de Kyoto prevé -por primera vez- que los países industrializados no sólo cumplan con su obligación de emitir menos CO₂ ahorrando energía, sino también creando nuevos depósitos de dicho gas. Se trata de superficies que (como por ejemplo los océanos y los bosques) absorben CO₂ de la atmósfera y lo fijan en forma de otros enlaces de carbono. Por eso es necesario aclarar lo que ocurre en estos momentos con aproximadamente 7.100 millones de toneladas (gigatoneladas, Gt) de carbono por año que el hombre produce en forma de CO₂

B

◀ Las mediciones de la temperatura promedio del hemisferio norte durante los últimos 1000 años muestran un incremento significativo a fines del siglo XX.

© según Kerr (2000), Science 288:589

(Fig. C). Las mediciones mundiales muestran que 3,2 Gt/año van a parar a la atmósfera. Es probable que los océanos incorporen casi 2 Gt/año, principalmente en virtud del buen grado de solubilidad del dióxido de carbono (CO_2) en agua. En este proceso, tres formas estarán en equilibrio químico reactivo: CO_2 disuelto (<1%), carbonato CO_3^{2-} (8%) y carbonato de hidrógeno HCO_3^- (91%). A medida que aumenta la concentración de CO_2 en la atmósfera, el agua de mar reduce su capacidad de absorción de CO_2 .

LA BÚSQUEDA DE CARBONO

La biomasa de los organismos vivos en el océano es unas mil veces menor que la del ecosistema terrestre. A pesar de ello, el fitoplancton marino produce anualmente la misma cantidad de material orgánico que los organismos terrestres. Cuando dichos seres vivos mueren, el material orgánico y mineral se sumerge hasta el lecho oceánico, donde se desintegra debido a la actividad de las bacterias o se deposita en sedimentos. Durante este proceso, la biomasa arrastra carbono y otros elementos. Aproximadamente el 25% del carbono se precipita a las profundidades, donde queda almacenado por cientos o miles de años y, por ende, desaparece de la atmósfera. Los científicos llaman a este proceso **bomba biológica**. Los cambios de potencia de la bomba biológica de los océanos durante extensos períodos son uno de los mecanismos de control más importantes de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera: sin esta bomba biológica, se estima que la concentración aumentaría 200 ppm.

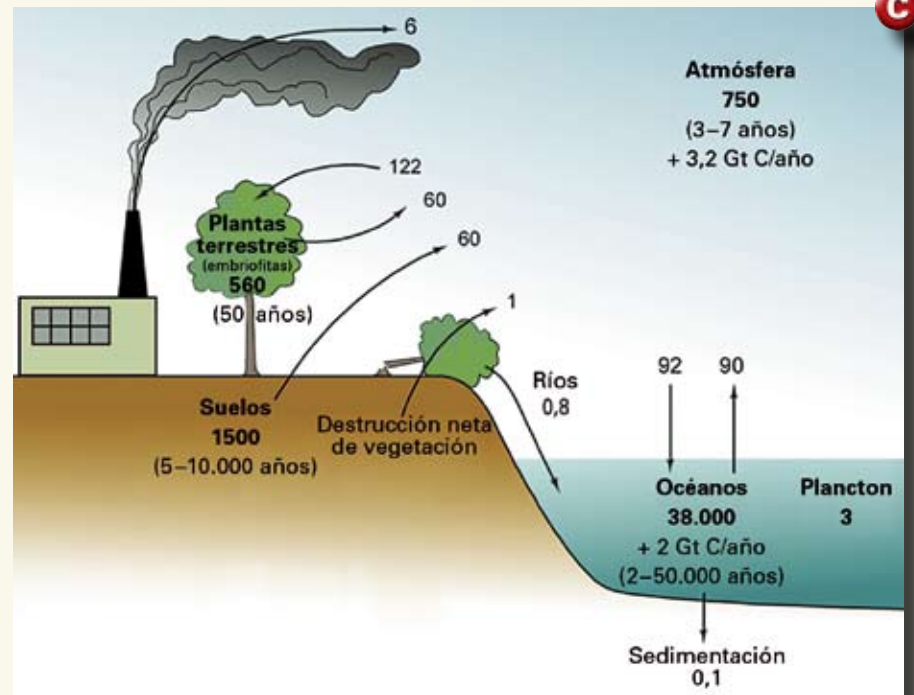
En el balance de carbono se produce un faltante de 1,9 Gt/año, que suele llamarse

“missing sink” o “carbono perdido”. Puede producirse otra acumulación de carbono, principalmente, en la biosfera, es decir en suelos y bosques, porque las plantas transforman el dióxido de carbono en compuestos de carbono durante el proceso de la fotosíntesis. Por degradación del material vegetal o su destrucción por fuego, el dióxido de carbono vuelve otra vez a la atmósfera, y lo hace de manera mucho más veloz que en el ciclo marino del carbono. “Después de transcurrir entre quince y cien años, una parte del carbono regresa a la atmósfera en forma de

dióxido de carbono”, explica Ernst-Detlef Schulze, director del Instituto Max-Planck de Jena. Por eso, todavía se discute el papel que desempeñan los depósitos biológicos de carbono a la hora de llevar a la práctica el Protocolo de Kyoto.

DETECTIVES CLIMÁTICOS IN SITU

Junto con grupos de investigadores de todo el mundo, los científicos del Max-Planck ponen bajo la lupa ciertos aspectos del ciclo del carbono. En este contexto siempre se trata de establecer dónde y qué cantidad de



▲ El ciclo global del carbono (C) medido en gigas (= miles de millones) de toneladas. (Las magnitudes de almacenamiento en negritas). Las mayores reservas se encuentran en los océanos (38.000 Gt C), le siguen los suelos con 1500 Gt C. En la atmósfera y en la biomasa de la vegetación se almacenan 750 y 560 Gt C respectivamente (entre paréntesis figura el tiempo medio de permanencia). En condiciones naturales, los procesos de absorción y emisión quedan prácticamente compensados. Sin embargo, el hombre altera el equilibrio del carbono. (Datos correspondientes a 1980-2000).

C

© Schliesinger, 1997

→ carbono desaparece en forma de compuestos moleculares. Un importante campo de investigación para los científicos de Jena es un amplio bosque de hayas en Turingia, al norte de la ciudad de Eisenach (Fig. D). Su particularidad radica en que el bosque que hoy pertenece al Parque Nacional de Hainich, se ubica directamente en la que fue la frontera alemana-alemana, por lo cual ha permanecido casi virgen en los últimos 60 años. Es decir que los científicos se han encontrado con un bosque que podría llamarse "primario" que prácticamente no ha sido tocado por la mano del hombre, y que se presenta como hace unos cientos de años todavía abundaba en extensas zonas de Europa. Los investigadores de Jena establecieron dos estaciones medidoras en el parque nacional: una torre de casi 40 metros para realizar análisis gaseosos y una estación terrena, que recolecta principalmente muestras de humus. Con la torre de mediciones, los científicos determinan la relación entre el dióxido de carbono absorbido y el emitido por el bosque, con el fin de responder a la cuestión largamente debatida, si un bosque con reservas arbóreas añosas es un depósito natural de carbono. Para establecer el flujo neto de CO_2 , los investigadores montaron varios equipos de medición en la torre (Fig. E). Con ellos es posible medir 20 veces por segundo la variación de la concentración momentánea de CO_2 en el aire que roza el extremo superior de la torre al pasar por ella. Además, se registran otros parámetros, tales como la temperatura, la intensidad del viento y la humedad atmosférica. Con su estación terrena, los científicos de Jena quieren averiguar en qué medida los suelos del bosque constituyen un depósito de carbono. Las muestras de humus y de plantas que se recolectaron en el Parque Nacional Hainich son analizadas en el instituto con ayuda de

modernos equipos. Las hojas, raíces y ramas que componen las plantas primero se deben limpiar, cortar y secar. Después, el material pasa al análisis de isótopos que ofrece datos sobre la velocidad en que una planta procesa el CO_2 del aire mediante la fotosíntesis. Con este fin, los investigadores se valen del hecho de que el carbono no sólo se presenta en la naturaleza con una masa 12, sino que un porcentaje ínfimo posee las masas 13 y 14. El comportamiento químico de las diversas moléculas de CO_2 de diferente peso de los diferentes isótopos es idéntico, aunque sus características físicas y sus velocidades de reacción son diferentes. Esto nos lleva a que los vegetales procesan más rápido el $^{11}\text{CO}_2$ del aire que el $^{13}\text{CO}_2$ o el $^{14}\text{CO}_2$. Al establecer la relación entre ^{12}C y ^{13}C o ^{14}C , por ejemplo en una hoja, los científicos pueden calcular la velocidad de la fotosíntesis y, por consiguiente, la capacidad con la cual la planta absorbe CO_2 de la atmósfera.

LOS CIENTÍFICOS HACEN UN BALANCE

Las investigaciones son financiadas por la UE, que ha creado la red científica del proyecto *CarboEurope*. Más de 100 estaciones medidoras continentales, distribuidas en todas las regiones climáticas y ecosistemas de Europa suministran datos sobre el aporte al ciclo del carbono. En la fase del proyecto que abarcó de 1998 a 2000, *CarboEurope* logró realizar un primer balance europeo del gas. Según éste, se estima que la biosfera terrestre de Europa continental (hasta los Urales) funciona como depósito de entre 135 y 205 millones de toneladas netas de carbono por año. Lo que equivale al 7-12% de las emisiones de carbono producidas por el hombre en el año 1995. A modo de comparación: en todo el planeta, la biosfera absorbe hasta un tercio de este tipo de emisiones de carbono.



▲ Medidores de radiación en una torre micro meteorológica.

Por lo tanto, la biosfera europea es sólo un pequeño depósito de carbono comparada con el alto grado de emisiones europeas provenientes de los combustibles fósiles, que exceden la media.

Las proyecciones de los científicos arrojan como resultado que los bosques y, posiblemente, también las zonas de pasturas absorben CO_2 , mientras que los campos de cultivo y las superficies anegadas vuelven a emitirlo en igual cantidad. Por lo tanto, las industrias agropecuaria y forestal influyen de manera decisiva en el balance del carbono de Europa. Por eso, una explotación planificada podría aumentar la absorción de carbono en las próximas décadas. La reforestación y gestión de carbono en los bosques sólo permite acumular carbono adicional en forma transitoria. "Hasta el momento no se ha aclarado, si la capacidad de acumulación de la biosfera posee un grado de saturación", explica Ernst-Detlef Schulze. "No podemos decir, en qué medida la biosfera volverá a ser una fuente de carbono por efecto del cambio climático o por aprovechamiento de la nueva biomasa generada y de una forma diferente de explotación de los suelos de cultivo. El estudio muestra con claridad los límites de nuestro saber actual". El objetivo a largo plazo debe ser acotar las emisiones de dióxido de carbono. También por eso, la UE hace largo tiempo que aprobó un proyecto que da continuidad al primero.



▲ Científicos del Instituto Max-Planck de Biogeoquímica tomando muestras en un bosque de hayas.

PIE DE IMPRENTA

Sociedad Max-Planck, departamento de información y relaciones públicas, Hofgartenstraße 8, 80539 München / e-mail: presse@gv.mpg.de

Redacción: Dra. Christina Beck
edición actualizada

Traducción: Astrid Wenzel

Diseño: www.haak-nakat.de

La Versión en español se hizo con el apoyo del DAAD y con fondos del Ministerio de Relaciones Exteriores de Alemania.

DAAD

Deutscher Akademischer Austausch Dienst
Servicio Alemán de Intercambio Académico

explora
Un Programa CONICYT

