

ESPECIAL

**CAMBIO
CLIMÁTICO
¿CÓMO COMBATIRLO?**

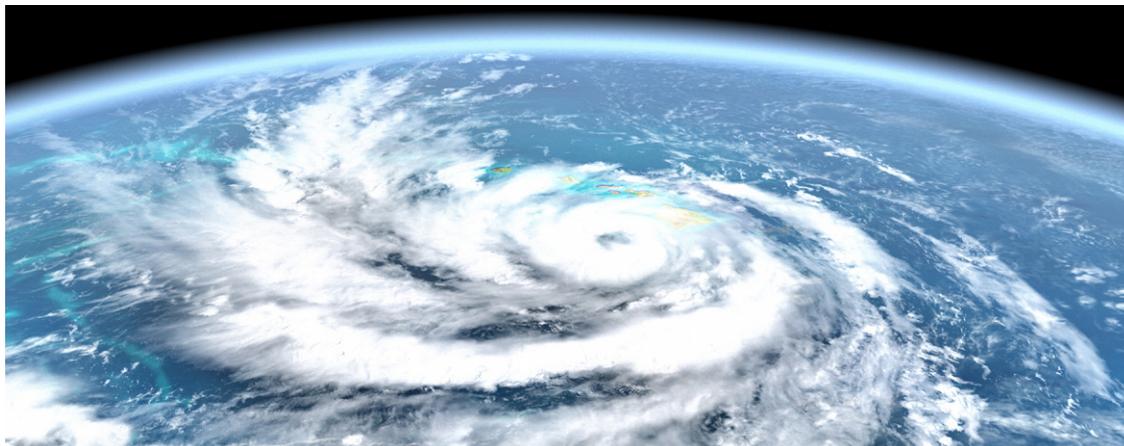
SCIENTIFIC
AMERICAN™

INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

ESPECIAL

Cambio climático: ¿Cómo combatirlo?

CONTENIDO



Una selección de artículos con diversas estrategias para afrontar la **crisis climática**.

Difícil, pero no imposible

Michael E. Mann
Investigación y Ciencia, diciembre 2015

Los mercados del carbono

David G. Victor y Danny Cullenward
Investigación y Ciencia, febrero 2008

Alimentación y efecto invernadero

Nathan Fiala
Investigación y Ciencia, abril 2009

Es hora de abandonar el objetivo de los 2°C

David G. Victor y Charles F. Kennel
Investigación y Ciencia, marzo 2015

Escépticos frente a ortodoxos

Michael D. Lemonick
Investigación y Ciencia, enero 2011

INCLUYE EL ARTÍCULO

Cómo afrontar un destino incierto

M. Granger Morgan

Más riqueza con menos carbono

Amory B. Lovins
Investigación y Ciencia, noviembre 2005

El lento ascenso de las renovables

Vaclav Smil
Investigación y Ciencia, enero 2014

La opción nuclear

John M. Deutch y Ernest J. Moniz
Investigación y Ciencia, noviembre 2006

El último recurso

Richard Conniff
Investigación y Ciencia, marzo 2019

Secuestro de carbono en los suelos forestales

Pere Rovira
Investigación y Ciencia, marzo 2017

Una solución integral al carbono

Steven L. Bryant
Investigación y Ciencia, enero 2014

Escudos contra la radiación solar

Robert Kunzig
Investigación y Ciencia, febrero 2009

Hacia una bioingeniería del planeta

Ricard V. Solé, Raúl Montañez y Salva Duran-Nebreda
Investigación y Ciencia, junio 2016

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1ª, 08021 Barcelona (España)
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

Copyright © Prensa Científica, S.A.

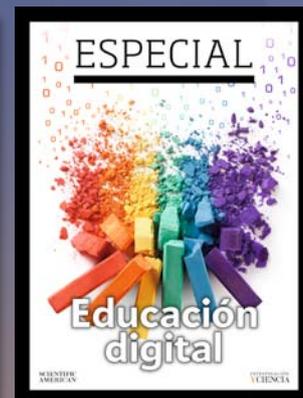
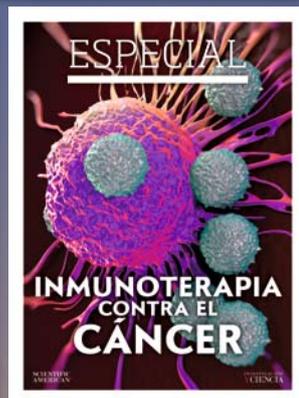
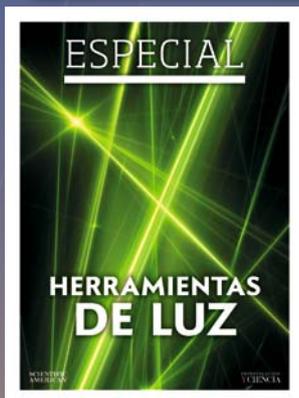
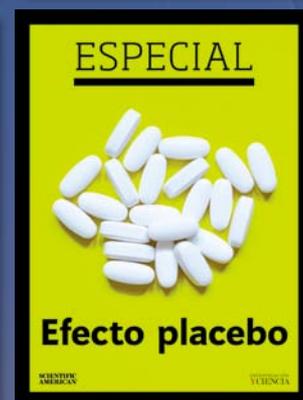
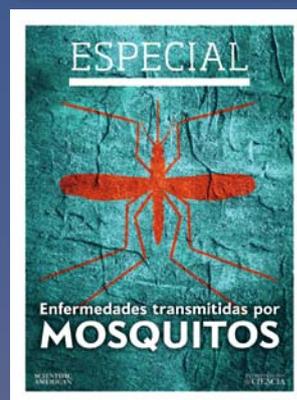
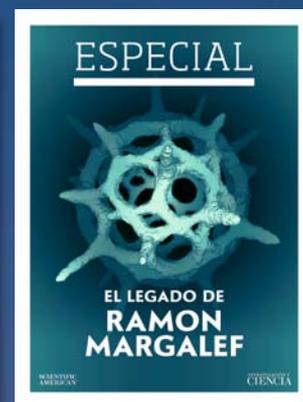
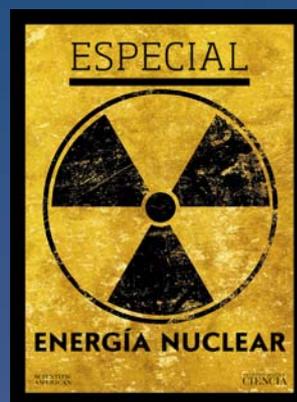
ESPECIAL n.º 43 ISSN: 2385-5657

En portada: Getty Images/redtea/iStock | Imagen superior: Getty Images/Harvepino/iStock

ESPECIAL

MONOGRÁFICOS DIGITALES

Descubre los monográficos digitales que reúnen nuestros mejores artículos (en pdf) sobre temas de actualidad



www.investigacionyciencia.es/revistas/especial



Prensa Científica, S.A.

Michael E. Mann es profesor de meteorología en la Universidad de Pensilvania. Participó en el proyecto del Grupo Internacional de Expertos sobre el Cambio Climático que recibió el premio Nobel de la paz en 2007.



Difícil, pero no imposible

Todavía estamos a tiempo de evitar
un calentamiento global peligroso

Michael E. Mann

MUY CUESTA ARRIBA SE LE hace al mundo evitar que la superficie de la Tierra se caliente más de 2 °C, pero si superamos este límite dañaremos gravemente el planeta. Es la cifra que motiva el compromiso de reducir las emisiones de gases de invernadero que muchas naciones adoptarán en la Conferencia del Cambio Climático de 2015, convocada por las Naciones Unidas. Se estará celebrando en París cuando esta revista salga a la calle.

Sin embargo, algunos, con intención crítica, sostienen que el llamado objetivo de los dos grados es imposible; según ellos, no da tiempo a implantar la tecnología necesaria para descarbonizar la economía [véase «Es hora de abandonar el objetivo de los 2 °C», por D. G. Victor y C. F. Kennel; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2015]. Pero sí da tiempo. El obstáculo no es físico, sino político y social.

Nadie dice que sea fácil. Más de setenta asesores de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático sostienen que limitar el calentamiento global a menos de dos grados «requiere una transición radical [...] no un mero ajuste de las tendencias actuales».

Solo podemos emitir hacia la atmósfera 270.000 millones de toneladas de carbono más para que el calentamiento no sobrepase los dos grados. Al ritmo actual de emisión de 10.000 millones de toneladas anuales quemaremos este «presupuesto de carbono» en solo treinta años. Según un análisis reciente, permanecer por debajo de los 2 °C exigirá que un tercio de las reservas de petróleo, la mitad del gas natural y un ochenta por ciento del carbón se queden en el suelo [véase «Reservas intocables», por M. Jakob y J. Hilaire; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2015].

No es pedir poco. Significa que debemos ir prescindiendo del carbón y olvidar-

nos de la mayor parte de las arenas bituminosas, si no de todas —adiós, oleoducto Keystone XL—. Significa también que no podemos quemar cantidades crecientes de gas natural como «puente» hacia un clima futuro más limpio alimentado por fuentes de energía renovables.

Suele equipararse el umbral de los dos grados con mantener la concentración atmosférica de dióxido de carbono por debajo de las 450 partes por millón (ppm). El reto se hace más difícil a medida que se usa menos carbón. Cuando se quema, este desprende a la atmósfera partículas que, al quedar suspendidas como aerosoles de sulfato, reflejan hacia el espacio una parte de la energía solar entrante. En un artículo que publiqué en estas páginas [véase «Falsas esperanzas»; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2014], calculé que, para compensar hacia finales del siglo la reducción a cero de las emisiones de azufre, tendremos que satisfacer un objetivo de



CO₂ de unas 405 ppm, apenas por encima de los niveles actuales.

¿Podremos hacerlo? Según el climatólogo James E. Hansen, sería posible extraer alrededor de cien mil millones de toneladas de carbono del aire mediante la reforestación masiva (limitando el uso de tierras en una medida suficiente para que los bosques puedan crecer de nuevo hasta cubrir una extensión como la que tenían antes de la deforestación humana). Esto, junto con la reducción de las emisiones de carbono en varios puntos porcentuales al año —empresa difícil pero factible—, podría satisfacer el objetivo de la estabilización en dos grados.

A lo largo de la historia, se ha certificado preventivamente un sinfín de imposibilidades que luego no fueron tales. Como Joe Romm, del Centro para el Progreso Americano, dijo respondiendo a los críticos en materia climática: «Gracias sean dadas a que estos opinadores no estaban por ahí cuando tuvimos que hacer algo difícil de verdad: sufrir millones de bajas y rehacer nuestra economía de la noche a la mañana para ganar la Segunda Guerra Mundial». Un inspirado acuerdo en la cumbre del clima de París de este mes podría poner en marcha un empeño ambicioso pero del todo realizable.

La clave es que hay innovaciones técnicas y economías de escala que surgen solo cuando se está haciendo realmente algo. El precio de las células solares, por ejemplo, ha caído mundialmente en más de un 50 por ciento a lo largo de los últimos años al incrementar China su producción. Los que dicen «no, no podemos» se dedican a las profecías que se cumplen a sí mismas.

Aun con innovación y economías de escala, en algún momento quizá tengamos que aplicar técnicas de «captura directa del aire» para extraer dióxido de carbono de la atmósfera. Sería caro, pero Klaus Lackner, profesor de ingeniería de la Universidad estatal de Arizona, confía en que el coste descendería hasta menos de 30 dólares por tonelada cuando se fabricaran en masa.

El coste de actuar es solo la mitad del de no hacerlo. No es una conclusión del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, sino de ExxonMobil, que ha calculado el verdadero coste del carbono para la sociedad en 60 dólares la tonelada. Otras estimaciones son aún más altas. ¿Podemos permitirnos estabilizar el calentamiento planetario por debajo de los dos grados? Lo que no podemos permitirnos es no hacerlo. ■

David G. Victor dirige el Laboratorio de Derecho y Regulación Internacional en la Universidad de California en San Diego.

Danny Cullenward investiga en la Institución Carnegie para la Ciencia y colabora con varias organizaciones relacionadas con la política climática.

Ambos han participado en el Programa de Energía y Desarrollo Sostenible de la Universidad Stanford.



Los mercados del carbono

La regulación de las emisiones de dióxido de carbono debe guiarse por señales de mercado más inteligentes y rigurosas

David G. Victor y Danny Cullenward

ES MUY PROBABLE QUE LOS SERES HUMANOS CALENTEMOS el clima de la Tierra durante este siglo hasta niveles preocupantes. La mayor parte del dióxido de carbono (CO₂) acumulado en la atmósfera procede de la quema de combustibles fósiles. Sin embargo, no basta con que se creen fuentes de energía más limpias. El mayor peligro estriba en no saber concebir instituciones y políticas que inciten a las empresas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Es un reto formidable. La energía tradicional, obtenida de combustibles fósiles, es tan abundante y barata, que sus alter-

nativas ecológicas tienen pocas esperanzas de aceptación sin el apoyo del poder político. Desgraciadamente, casi dos décadas de negociaciones sobre tratados limitadores de las emisiones globales han dado escasos frutos. Pero en Europa y otras regiones, más preocupadas por el cambio climático, los gobiernos han adoptado iniciativas de las que se desprenden lecciones sobre el mejor modo de refrenar las elevadas dosis de carbono que la atmósfera del planeta ha de ingerir.

En particular, los políticos de EE.UU., donde históricamente se ha emitido más CO₂ que en cualquier otro país, pueden aprender mucho de los recientes esfuerzos europeos por crear

EN SÍNTESIS

Para evitar graves trastornos climáticos, debe cesar el aumento de las emisiones de dióxido de carbono.

Resulta eficaz gravar con impuestos las emisiones de carbono, pero consideraciones políticas desaconsejan tal solución en EE.UU. Sería más práctico un mercado federal de «topes y transacciones», en el que los contaminadores adquieran derechos de emisión y elijan la manera de cumplir sus objetivos de reducción.

Para que logren sus propósitos, debe vigilarse los mercados del sistema de topes y transacciones con mucha atención. No pueden realizar su labor sin políticas complementarias relativas a las emisiones. Un análisis detallado del actual mercado del carbono en la Unión Europea ofrece ideas interesantes.

EL COMERCIO DE LOS DERECHOS
de emisión del carbono intenta
reducir las emisiones de gases de
invernadero al menor coste posible.



mercados que recorten las emisiones carbónicas, analizando los casos en que han logrado éxito o han sido insuficientes.

Hasta hace muy poco, el debate sobre la creación de instituciones protectoras del clima se mantenía casi enteramente a un nivel global. Se suponía que bastaban los acuerdos internacionales para influir positivamente en el clima, ya que las actividades que lo modifican son de ámbito mundial. Si los gobiernos nacionales tuvieran que actuar por su cuenta, sin coordinación global, las industrias solo tendrían que trasladarse a donde hubiera una normativa más tolerante.

Esta hipótesis globalista guió la negociación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en 1992, que pedía a todos los países que abordaran de buena fe el problema del clima y creaba una organización supervisora del cumplimiento de los términos del tratado. De ahí surgieron nuevas tentativas de acuerdo climático, al fin recogidas en el Protocolo de Kioto de 1997. Según el mismo, el mundo industrializado —es decir, EE.UU., la Unión Europea, Japón y Rusia— aceptaba, en principio, obligaciones, adaptadas a las circunstancias de cada firmante, que en caso de cumplirse reducirían las emisiones industriales en un promedio cercano al 5 por ciento con respecto a los niveles de 1990. Pero los países en vías de desarrollo, que daban prioridad máxima al crecimiento económico sin trabas en el gasto de energía, se negaron a aceptar límites a sus emisiones.

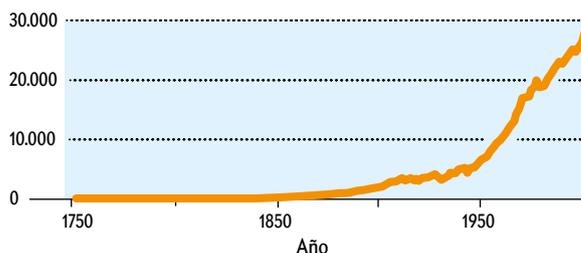
MECANISMO PARA UN DESARROLLO LIMPIO

Carentes de poder para imponer un control de sus emisiones a los países en vías de desarrollo, los signatarios de Kioto llegaron a una solución de compromiso, el «mecanismo para un desarrollo limpio». Consiste en que los inversores internacionales puedan conseguir derechos de emisión de carbono con dinero que se empleará en financiar proyectos de reducción de emisiones en un país en vías de desarrollo, aunque este país no asuma ninguna restricción obligatoria en su producción de gases de invernadero. Es decir, una empresa británica sujeta a estrictas (y por tanto costosas) limitaciones de sus emisiones en el Reino Unido podría invertir en la construcción de plantas eólicas en China. Dicha firma obtendría entonces derechos de emisión equivalentes a la diferencia entre las emisiones «de referencia» que hubiera producido China quemando carbón (la fuente de energía más común en ese país) y las emisiones, esencialmente nulas, que desprenden los generadores eólicos. China se beneficiaría de la inversión extranjera y de la infraestructura energética, mientras que la parte británica podría cumplir sus compromisos medioambientales a un menor coste; en las naciones industriales, suele traer más cuenta ganar derechos de

Los impuestos sobre las emisiones de carbono evitan el proceso de asignación de derechos de emisión, sujeto a corrupciones y presiones políticas. Además, dejan claro cuáles serán los costes.

DIÓXIDO DE CARBONO PRODUCIDO POR COMBUSTIBLES FÓSILES EN EL MUNDO

Millones de toneladas



EXCESO DE CARBONO: El aumento de las emisiones de carbono procedentes del uso de combustibles fósiles está calentando el clima. Reducir las emisiones requerirá grandes esfuerzos.

emisión en el exterior que reducir las emisiones en el ámbito doméstico incorporando nuevas técnicas a sus actuales instalaciones e infraestructuras.

Desde entonces, el mecanismo para un desarrollo limpio ha creado un mercado que ha estado creciendo deprisa; el comercio de derechos, por un monto de unos 3000 millones de euros en valor anual, afecta a un tercio del 1 por ciento de las emisiones de gases de invernadero en el mundo.

Aunque las negociaciones de Kioto culminaron enseguida en un acuerdo escrito, las naciones industriales, donde las obligaciones son más exigentes, han cumplido las restricciones de modo muy desigual. Países importantes, sobre todo EE.UU. y también Australia y Canadá, han esquivado el tratado de Kioto por encontrar demasiado onerosos o antipolíticos sus requisitos. Por eso el tratado nunca ha logrado su pleno efecto sobre el calentamiento global. De todos modos, no sería grande aunque todas las naciones cumplieran sus mandatos. Los tratados internacionales que cubren ámbitos muy extensos suelen sufrir esos problemas: en el afán de llegar a un acuerdo, reflejan los intereses de los menos entusiastas y suelen incluir cláusulas que permiten un escape fácil a quienes no respeten los términos de adhesión.

EVALUACIÓN DE LA POLÍTICA CLIMÁTICA

Por la dificultad de establecer metas globales significativas, solo ahora, diez años después de Kioto, está empezando a tomar forma un sistema internacional capaz de mitigar el cambio climático. Un grupo de países más empeñados en regular las emisiones está conformando una política eficaz. A diferencia del enfoque integrado global imaginado en Kioto, cada nación ha adoptado una estrategia diferente para controlar sus emisiones de gases de invernadero. La diversidad de los planes refleja las profundas incertidumbres sobre los mejores procedimientos de control, así como las enormes variaciones en capacidad y estilo de los distintos gobiernos.

Los esfuerzos para limitar las emisiones de gases de invernadero dentro de la Unión Europea son esenciales porque, al retirarse del Protocolo de Kioto los EE.UU., la UE se ha convertido en la mayor entidad política que mantiene un plan de regulación detallado. El sistema europeo comprende las instituciones más poderosas e intercambia el máximo volumen de derechos de

El comercio de carbono

Al suscribir el Protocolo de Kioto, que entró en vigor en febrero de 2005, la mayoría de las naciones industrializadas acordaron disminuir en un 5,2 por ciento (con respecto a los niveles de 1990) sus emisiones totales de gases de efecto invernadero durante el período que va de 2008 a 2012. Cada gobierno participante tiene su propio objetivo nacional de reducción de emisiones de CO₂.

El comercio del carbono es un sistema de transacción de derechos que pretende atajar el cambio climático. Se basa en la idea de que, para el planeta entero, cuáles sean las fuentes de CO₂ resulta mucho menos importante que las cantidades totales lanzadas a la atmósfera. En vez de imponer reducciones estrictas país por país, la comercialización del carbono emitido deja elegir a los contaminadores: pagar para recortar las emisiones de sus propios equipos, o seguir generando CO₂ y pagar a otros —en ciertos casos, organizaciones del mundo en vías de desarrollo donde los costes suelen ser más bajos— para que disminuyan su producción de gases de invernadero. En teoría, esta solución aminora las descargas de gases con efecto de invernadero al menor precio posible.

Mercado de topes y transacciones

Supongamos que la compañía A emite CO₂ por encima del total de derechos que tiene asignados, mientras que la compañía B emite menos de lo que podría por los derechos que se le concedieron (*izquierda*). A puede entonces pagar (comprar) a B los derechos de emisión que no ha utilizado y aprovecharlos para cumplir sus compromisos de emisión (*derecha*).

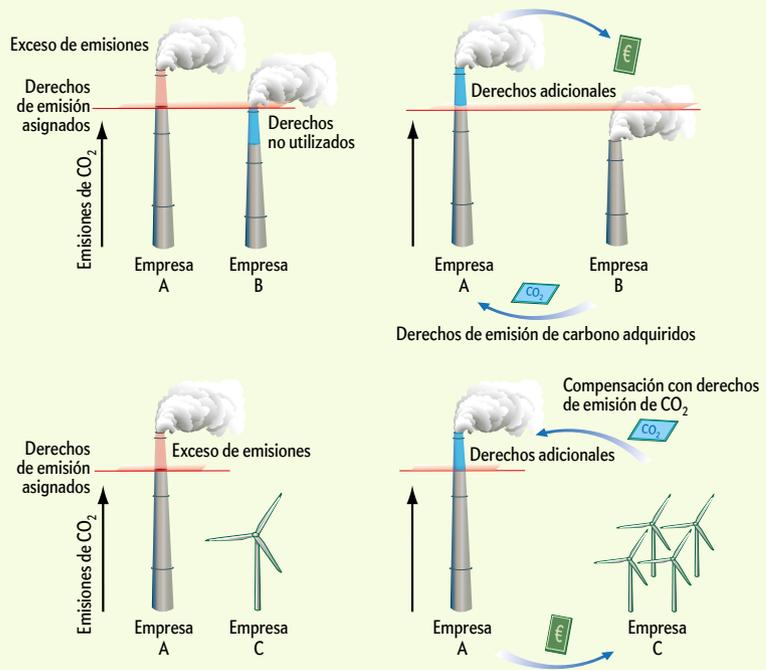
Intercambio de compensaciones

Imaginemos que la compañía A sobrepasa su margen asignado. A través del MDL establecido en Kioto, la compañía puede invertir en un proyecto de reducción de carbono que acometa la compañía C en una nación en desarrollo, cuyo coste será menor que el de un proyecto similar en el país desarrollado (*izquierda*). La compañía A consigue los derechos que necesita a un coste reducido, y la C recibe el dinero que le falta. El CO₂ total emitido a la atmósfera será menor que si el país en vías de desarrollo hubiese recurrido a una fuente de energía de origen fósil (*derecha*).

El comercio de carbono se produce de dos maneras. La primera es un mercado de «topes y transacciones», por el cual se marca un límite a las emisiones y los que contaminan reciben derechos de emisión negociables (*arriba*); cada uno de ellos permite emitir una tonelada de CO₂. En 2005 la Unión Europea estableció este tipo de sistema, obligatorio para las compañías radicadas en Europa, y que hoy constituye el mayor mercado de carbono del mundo.

En la segunda, las emisiones se compensan total o parcialmente por medio de derechos procedentes de proyectos de desarrollo (*abajo*). Por ejemplo, en el mecanismo de desarrollo limpio fijado en Kioto se permite a los países industrializados obtener derechos merced a la financiación de proyectos de baja emisión de carbono en países en vías de desarrollo.

La extensión del comercio de carbono en todo el mundo no está bien cuantificada; los mercados todavía son recientes, no es fácil conocer datos de las transacciones y existen varias modalidades. El Banco Mundial estima, sin embargo, que en 2006 el valor de las transacciones de carbono se aproximó a los 30.000 millones de dólares.



emisión. Con miras a fomentar la eficacia energética, la Unión y sus estados miembros han ampliado políticas ya existentes, hasta abarcar el 55 por ciento de sus emisiones totales, en particular las producidas por las edificaciones y los medios de transporte. Las directrices aludidas incluyen como meta voluntaria (pronto será obligatoria), ahorros de combustible de automoción negociados con los fabricantes del sector.

Las fuentes de gases de invernadero restantes, las que generan «emisiones industriales», entre ellas las centrales térmicas, son menos en número y de mayor tamaño. Por tanto, más fáciles de controlar. Para este tipo de industrias se ha constituido

en Europa una estructura de mercado a escala continental, un sistema de comercio de emisiones del tipo de «topes y transacciones». El sistema se ha inspirado en un programa que en EE.UU. se aplicó con éxito a la reducción del SO₂, causa principal de la lluvia ácida.

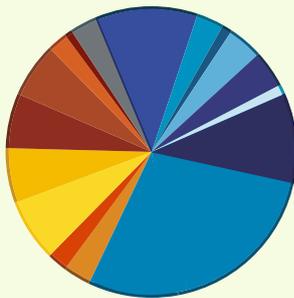
En la Unión Europea, cada gobierno concede a sus plantas industriales «derechos de emisión»: un derecho permite emitir una tonelada de dióxido de carbono. Los derechos se conceden gratuitamente a las industrias hasta un límite, que se calcula de acuerdo con el techo de emisiones asignado a cada país. Cada empresa decide entonces si le trae más cuenta reducir sus

Financiación de proyectos ecológicos en el exterior

El mecanismo para un desarrollo limpio (MDL) convenido en el Protocolo de Kioto permite a las firmas de países industrializados invertir en proyectos de reducción de gases de invernadero de países en vías de desarrollo, como alternativa a realizar proyectos similares, más costosos, en sus propios países. Estos acuerdos compensan con derechos de emisión a las compañías inversoras. Los gráficos circulares (abajo, izquierda) describen los tipos

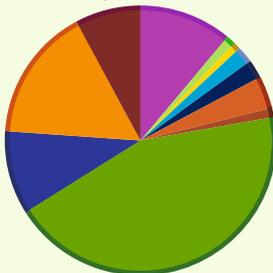
y localizaciones de los 1534 proyectos comprendidos en el MDL. Los críticos sostienen, con razón, que algunas de las reducciones de emisiones cubiertas por el MDL son fraudulentas (en especial, las relativas al HFC-23); por ejemplo, permiten que el MDL pague del orden de 10.000 millones de euros de aquí a 2012 a proyectos reductores del HFC-23 que solo deberían costar del orden de 100 millones (véase el recuadro «Burlar al sistema»).

PROYECTOS ACTUALES FINANCIADOS POR MDL
Desglose de proyectos cubiertos por el MDL



Proyectos de reducción de CO ₂		Otros proyectos de residuos gaseosos		
Calor desperdiciado	3%	Vertederos	11%	Metano
Tratamiento del cemento	2%	Ganadería	3%	
Combustibles de biomasa	7%	Aguas residuales	1%	
Energía hidroeléctrica	6%	Campos petrolíferos	4%	
Energía eólica	6%	Minas de carbón	4%	Óxido nítrico
Turbina de gas combinada	6%	Acido nítrico	1%	
Cambio de combustible	2%	Acido adipico	10%	
Eficacia energética	1%	HFC-23 de la fabricación de refrigerantes	28%	
Otros	3%			

PORCENTAJE MEDIO ANUAL POR PAÍS DE UNIDADES DE REDUCCIÓN DE EMISIONES
Porcentaje total



Países			
Corea del Sur	8%	Chile	2%
India	16%	Argentina	2%
Brasil	10%	Qatar	1%
China	44%	Malasia	1%
Sudáfrica	1%	Otros	9%
México	4%		



Los gases de invernadero emitidos en el mundo desarrollado (arriba) pueden compensarse con emisiones bajas en carbono en las naciones en desarrollo (abajo).

emisiones por debajo de ese límite —y así podrían vender los derechos que les hayan sobrado— o comprar derechos a otras industrias en el mercado libre. Las empresas y los gobiernos pueden, asimismo, conseguir derechos gracias al mecanismo para un desarrollo limpio antes citado y en un sistema similar que genera derechos en Rusia y otros países del antiguo bloque del Este.

Si los recortes de emisiones resultan costosos, la demanda de derechos crecerá y, por tanto, su precio. Por el contrario, los precios caerán si aparecen técnicas de bajo coste que reduzcan las emisiones de CO₂ o bien las industrias emisoras bajan su producción por razones económicas. La UE fija los niveles de polución limitando el número total de derechos, cuyo precio lo determina el mercado. El período de prueba para el nuevo mercado europeo ha abarcado desde 2005 hasta el final de 2007.

Como cualquier mercado que implique la concesión de nuevos derechos de propiedad, el del carbono depende de decisiones políticas. Los políticos y las industrias interesadas suelen presionar en favor del mercado de derechos, no de un impuesto.

Por una razón obvia: los sistemas políticos tienden a conceder gratuitamente la mayoría de los derechos de emisión, mientras que los impuestos entrañan muchos más costes visibles.

En tiempos pasados, algunos sistemas de mercado han sustituido parte de sus derechos, pero los «grandes del carbono», como las minas y las centrales de energía de carbón, se están organizando para oponerse a esas tentativas. Los gobiernos de la Unión Europea han acordado conceder gratis la mayoría de los derechos a los emisores actuales; casi toda la legislación climática propuesta en EE.UU. impondría una cesión semejante. En otras situaciones, en que los gobiernos han cedido derechos de propiedad a entidades privadas (licencias de telefonía móvil, por ejemplo), las subastas no han encontrado una oposición política tan radical, porque esas empresas no estaban explotando antes esos bienes públicos; en cambio, la industria de combustibles fósiles gozaba de libertad para emitir a la atmósfera gases de invernadero.

La ley crea los mercados de la contaminación: se designa propiedad valorable lo que antes no lo era. Los participantes en

los nuevos mercados del carbono van a ganar o a perder, según estén formuladas las leyes de asignación de derechos. Cuando se trate de asignar derechos de propiedad a bienes ya poseídos, la regla suele ser la cesión con ánimo político, no la subasta.

Algunas de estas entregas gratuitas son políticamente oportunas: ayudan a iniciar un mercado que podría bloquearse por intereses arraigados, como los del carbón. Pero si todos los derechos se regalaban, aumentaría el peligro de afianzar las técnicas de los grandes y antiguos productores de carbono.

Ante tales circunstancias, no es raro que el mercado del carbono de la Unión Europea haya sufrido problemas de infancia durante su breve historia. En muchos casos, los planes de asignaciones de derechos concebidos por cada gobierno nacional han llegado después de la fecha límite y no han cubierto todos los emisores. Pero el aspecto más controvertido es que los políticos acostumbran favorecer a ciertas firmas o sectores empresariales, y a dinamizar el mercado con derechos de emisión baratos y cuestionables obtenidos del mecanismo para un desarrollo limpio. El gobierno alemán, por ejemplo, en el afán de proteger su industria del carbón, concedió demasiados derechos gratuitos a las centrales eléctricas que consumen ese combustible. Los propietarios de las centrales cargaron después a sus clientes unos «costes» del carbón que los propietarios nunca tuvieron que pagar. Irregularidades semejantes han ocurrido también en España, Países Bajos y Reino Unido.

En principio, la Unión Europea revisa la asignación de derechos a cada gobierno con miras a que no se subvencione injustamente a las compañías preferidas. Sin embargo, los estados miembros tienen en su mano las principales bazas políticas y no dudan en jugarlas como mejor les parece. El sistema europeo reasigna los derechos de emisión cada cinco años; al cabo de ese plazo, se entregarían de nuevo derechos gratuitamente, lo que dificultaría que se descarten las técnicas de alto contenido carbónico que producen la mayoría de las emisiones. [Nada más cerrarse este número, es posible que la UE decida subastar la mayoría de los derechos de emisión.]

El eficaz programa de reducción de lluvia ácida en EE.UU., pese a que también asignó casi todos sus derechos gratuitamente, ha mantenido estables sus reglas básicas cerca de veinte años, lo que ha facilitado el correcto funcionamiento del mercado.

Otro problema en la UE ha sido el de garantizar que los emisores, intermediarios y negociantes tengan acceso a una información inmediata y exacta sobre oferta y demanda de derechos de emisión de carbono. Durante el período de prueba del plan de comercio de emisiones, la confusión del mercado hizo que los precios de la emisión de una tonelada de CO₂, en los contratos que expiraban antes de finales de 2007, girasen desde un máximo de alrededor de 30 euros por tonelada de CO₂ en abril de 2006 hasta un mínimo de un par de céntimos de euro en diciembre de 2007. La pérdida de valor fue debida a la excesiva acumulación en el mercado de derechos de emisión por los gobiernos europeos, efecto que recuerda la inflación que sobreviene cuando un banco central mal gestionado lanza demasiado papel moneda. Para combatir el problema, la Unión Europea ha apretado las clavijas para el próximo periodo de transacciones (2008 a 2012), por lo que el precio de los correspondientes derechos no se ha desplomado: a principios de enero de 2008 se vendían a un año vista a casi 24 euros.

Mercados de nueva planta

Cuando un gobierno establece un mercado para negociar con el dióxido de carbono, hay que conceder derechos de propiedad en materias en las que antes no había ninguno. Por desgracia, las grandes empresas con buenas relaciones políticas suelen recibir un trato de favor, incluso en términos financieros. Por ejemplo, dentro del sistema de comercio de emisiones de la Unión Europea, el gobierno de Alemania concedió derechos de emisión gratuitos a las centrales eléctricas de carbón. A continuación, sus propietarios, con influencia en las decisiones políticas, cobraron a los usuarios unos «costes» por emisión de carbono, pese a que esas empresas nunca habían incurrido en ellos.

Al implantar estos mercados, la cantidad de derechos expedidos debe ser igual a la producción real de emisiones de carbono, cosa que puede ser difícil de evaluar. Si se asignan demasiados derechos, finalmente el valor de cada derecho caerá cuando llegue a conocerse el exceso de asignaciones: esto es lo que ha ocurrido en el plan de comercio de emisiones de la Unión Europea a partir de abril de 2006 (gráfico).

Para evitar muchos de estos problemas, los derechos de emisión deberían subastarse a los mejores postores. Todavía sería mejor instituir un gravamen sobre el carbono emitido; ello evitaría un proceso de asignación de derechos de propiedad valiosos, altamente politizado y sujeto a corruptelas. Además, sacaría a la luz los costes reales del cumplimiento del plan, con lo que los productores de energía podrían hacerse una idea de las inversiones a realizar.

ASCENSO Y DESCENSO DE LOS PRECIOS DE DERECHOS EN EUROPA

Euros por tonelada de dióxido de carbono



La volatilidad de precios de los derechos de emisión de carbono se agudizó cuando los gobiernos europeos concedieron demasiados derechos a los contaminadores nacionales. Su valor sufrió inflación hasta que se conoció el exceso de asignaciones en 2006.

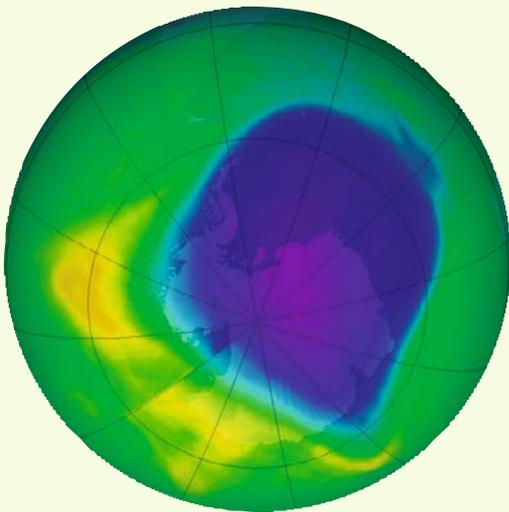
EXPANSIÓN DE MERCADOS POR TODO EL MUNDO

La experiencia de la Unión Europea nos enseña que los sistemas de comercio de derechos, como todos los mercados, no surgen espontáneamente. Los historiadores económicos han determinado que los mercados han de apoyarse en instituciones sólidas que asignen derechos de propiedad, vigilen las conductas y hagan respetar las normas. Desde hace tiempo la UE guarda

Burlar al sistema

Los mercados emergentes en los que los gobiernos asignan derechos de propiedad se enfren tan a un problema común: la distribución equitativa de la información sobre las transacciones y el mal uso de las reglas del juego. Los compradores que consiguen informaciones por adelantado pueden adquirir por poco precio una propiedad antes de su valoración correcta y, de ese modo, aprovecharse de su apreciación futura. Así ocurrió cuando empezó a funcionar el mecanismo para un desarrollo limpio (MDL) promovido en Kioto. Los derechos de emisión obtenidos a bajo precio por industriales avisados se encarecieron de repente, cuando empezó a crecer la demanda de los recién enterados: los madrugadores habían dado un buen golpe.

Se manipuló el MDL cuando los inversores se percataron de la dificultad de determinar las cantidades de referencia para las emisiones de las centrales existentes, que luego se compararían con las resultantes de los proyectos de reducción. Se decidió entonces concentrar esfuerzos en la implantación de técnicas de control de emisiones a la salida del proceso de producción, en vez de introducir cambios radicales en la industria. De ahí que cerca de un tercio de los derechos obtenidos gracias al MDL tengan relación con proyectos destinados a recortar las emisiones de un potente gas de invernadero: el trifluorometano, o HFC-23. Con una intervención nada cara se puede detener la emisión de HFC-23, pero a las compañías del mundo en desarrollo les conviene retrasarla porque así pueden inflar sus valores de referencia. Ese retraso les ha permitido acumular unidades de reducción de emisiones del MDL, que los compradores canjean por derechos de emisión europeos, por un valor muy distante del coste real de la eliminación del HFC-23. Con esa artimaña se han podido embolsar miles de millones de dólares, aunque la total eliminación de ese gas nocivo solo requería la décima parte de la cifra.



El cierre del agujero de ozono mediante la sustitución de refrigerantes de CFC por los de HFC-23 dio lugar a un subproducto residual con efecto de calentamiento y que, por tanto, también había que eliminar.

registro de otros agentes contaminantes, como los óxidos de azufre y nitrógeno, producidos por las mismas fuentes. Asimismo, la observancia de las normas legales europeas goza de una reputación sólida y acreditada. Si no existieran instituciones administrativas de esa altura, carecerían de valor los derechos de emisión en Europa.

El papel esencial de las instituciones y los intereses locales explica el desarrollo de numerosos sistemas diferentes de comercio del carbono en las distintas partes del mundo. Sin duda alguna, un mercado de carbono de ámbito mundial va creciendo de abajo arriba, y no de arriba abajo, en virtud de un mandato internacional como el Protocolo de Kioto: eso significa que quizá se tarden decenios en conseguir un sistema realmente global.

Cuando Estados Unidos establezca un sistema nacional, el volumen de las emisiones que comercialice podría arrebatar a la Unión Europea el dominio del pujante mercado mundial del carbono. Es difícil un pronóstico exacto sobre la evolución que tendría ese mercado, dado que se va configurando sobre la marcha. Varios estados del nordeste y el oeste, hartos de la inacción del gobierno federal, se disponen a crear sus propios sistemas de comercio de emisiones carbónicas. Dudamos que esos sistemas sobrevivan intactos cuando se implante un plan federal: una razón de peso es que la generación de electricidad (gran productora de CO₂) se distribuye entre vastas porciones de la red eléctrica nacional y no es fácil segmentarla por estados. No obstante, ciertos estados tal vez mantengan normas más estrictas, lo que podría crear en la nación un mosaico de sistemas de comercio de carbono.

SEDUCIR A LOS REACIOS

Las naciones en auge, como China e India, ofrecen fuerte resistencia a la expansión de los sistemas de comercio de derechos de emisión: dan máxima prioridad al crecimiento económico y dependen mucho de los combustibles fósiles. Las emisiones de dióxido de carbono en esos países crecen tres veces más deprisa que en el mundo desarrollado. Durante el próximo decenio, su producción total de CO₂ llegará a sobrepasar la del occidente industrializado. Ahora mismo, China ya es el mayor emisor del mundo. Además, esas economías emergentes suelen apoyarse en técnicas anticuadas en las que habría oportunidad, al menos teórica, de ahorrar dinero si se modernizaran los controles de emisiones.

No sería aconsejable obligar a los países menos adelantados a que se adhieran a un sistema internacional de comercio de emisiones ya implantado. Acuciadas por restricciones económicas, y además sin certidumbre acerca de sus niveles de emisión en el futuro y los costes que tendría ponerles freno, estas naciones exigirían un margen de crecimiento generoso. Aceptar semejante estrategia, aun con la mejor intención, supondría concederles unos topes de emisiones relajados; ello contrarrestaría los esfuerzos por controlar las emisiones en cualquier otro lugar del mundo, ya que habría un exceso de derechos inundando los mercados mundiales.

En vez de intentar fijar a esos países un límite de emisiones que van a rechazar, el mecanismo para un desarrollo limpio refleja un compromiso que en teoría restringiría el mercado a las zonas donde los países en vías de desarrollo hayan conseguido verdaderas reducciones. Y como el mayor mercado de derechos de emisión radica en la Unión Europea, los precios del

El protagonismo de instituciones e intereses locales explica las diferencias entre los sistemas de mercado del carbono desarrollados en distintas partes del mundo.

mecanismo para un desarrollo limpio han llegado a converger con los que en ella se establecen.

MANIPULACIÓN DEL MERCADO

No es, sin embargo, menos cierto que el mecanismo de desarrollo limpio esconde un lado oscuro que cuestiona la integridad de todos los mercados del carbono. A los inversores les cuesta identificar el nivel de emisiones que han de tomar como referencia, la tendencia con la que deberían compararse las emisiones de un nuevo proyecto. Por eso se han dedicado a implantar técnicas depuradoras que se aplican al final del proceso productivo, en vez de transformaciones más profundas de los sistemas de energía que realmente condujesen a menores emisiones de gases de invernadero. Como ejemplo, alrededor de un tercio de los derechos de emisión del mecanismo para un desarrollo limpio proceden de proyectos cuyo fin es controlar un solo gas industrial, el trifluorometano o HFC-23, producto secundario con un efecto de invernadero 12.000 veces más fuerte que el del CO₂.

La cuestión es cómo suprimir del mejor modo posible las emisiones de HFC-23 en las naciones en desarrollo. Todas las plantas del mundo industrializado han instalado dispositivos de bajo coste para eliminarlas, y firmas destacadas han compartido esta técnica con todos los que van llegando. Pero en países en vías de desarrollo los fabricantes han descubierto que les conviene demorar la instalación de tales dispositivos. Así mantienen unos niveles de referencia de emisiones altos, a los que corresponderá un generoso número de «unidades de reducción de emisiones» por parte del mecanismo para un desarrollo limpio, que los europeos comprarán para canjearlos por derechos de emisión a un precio que no se compagina con el coste real de la supresión del HFC-23 remanente.

Según datos de Michael Wara, de la Universidad de Stanford, los inversores en esos proyectos recogerán un total del orden de 10.000 millones de euros de aquí a 2012, cuando solo se necesitarían unos 100 millones para pagar los dispositivos que eliminan el nocivo compuesto.

Las naciones desarrolladas abordarían mejor el problema del HFC-23 y otros gases de origen industrial pagando directamente, sin más, el equipo necesario. El Protocolo de Montreal aplicó con éxito ese método para preservar la capa de ozono. Los desastrosos efectos del mecanismo para un desarrollo limpio se agravan porque la Unión Europea acoge todo derecho de emisión aprobado según las normas del mecanismo, que se fijan mediante un farragoso proceso, a través de diversas comisiones, amparado por el Protocolo de Kioto.

Cuando EE.UU. establezca su propio mercado del carbono, esos falsos derechos deberían rechazarse mediante la aplicación de normas más estrictas, que determinen si los participantes

pueden ganar derechos obtenidos del mecanismo para un desarrollo limpio y otros programas de ese género.

La mejora del referido mecanismo no será suficiente para lograr el compromiso de los países en vías de desarrollo. Si se les obliga a limitar sus emisiones, seguramente reaccionarán en contra. Más efectivo sería atender a los casos en que la reducción del carbono favorezca los intereses actuales del país. China, por ejemplo, preocupada por la disponibilidad de energía, fomenta ahora que se maximice el rendimiento. Unos cambios de política verosímiles podrían recortar en mil millones de toneladas por año las emisiones de CO₂ de aquí a 2020. Durante ese período, calculamos que la fuerte expansión del programa de energía nuclear de uso civil en India podría reducir sus emisiones de carbono en 150 millones de toneladas por año. Por comparar, los esfuerzos de la Unión Europea entera por cumplir los objetivos de Kioto conseguirán un recorte de solo 200 millones de toneladas anuales; entre todos los proyectos del mecanismo para un desarrollo limpio se ahorrarán 170 millones de toneladas por año.

UN PLAN EN CINCO ETAPAS

Ante la magnitud del desafío climático y los temibles efectos de un retraso, recomendamos cinco pasos hacia una estrategia más eficiente.

Ante todo, Estados Unidos debería establecer un impuesto obligatorio para controlar la producción de gases de efecto invernadero. Si, en vez de recurrir a un régimen de «topes y transacciones» para los derechos de emisión, se gravase a los que emiten CO₂, se evitaría el proceso de asignación de derechos de propiedad valorables, sujeto a corruptelas y presiones políticas, y quedarían claros los costes a largo plazo del cumplimiento de la política adoptada, de modo que la industria podría prepararse con mayor eficacia. La volatilidad de los sistemas de comercio de derechos entorpece una planificación sensata.

En segundo lugar, si el Congreso de EE.UU. prefiriera un sistema de topes y transacciones, sería acertado crear una «válvula de seguridad» que fijara un techo a los precios de los derechos

EL VOLUMEN DE TRANSACCIONES Y EMISIONES

La cantidad de gases de invernadero negociados por año en todos los mercados del carbono se queda pálida ante las emisiones anuales del planeta.

Las cifras inferiores indican los millones de toneladas métricas de CO₂ equivalente:

49.000

Total mundial de emisiones de gases de invernadero en 2004

1597

Total mundial del mercadeo de carbono en 2006

Puede entenderse el alcance de la menor de estas dos cifras teniendo en cuenta que un coche mediano emite cinco toneladas de CO₂ por año; el mercado mundial de carbono equivale a las emisiones anuales de 300 millones de automóviles. (En EE.UU. circulan unos 250 millones.)

Control de emisiones

- 1** El gobierno de EE.UU. debería instituir una política fiscal obligatoria para el control de las emisiones. Los impuestos darían señales claras y de largo alcance sobre los precios. Las empresas podrían así decidir inversiones sensatas para reducir sus emisiones de carbono. Por el contrario, los sistemas de comercio de carbono se caracterizan por la volatilidad de precios, que dificulta la planificación. Un impuesto reduce las oportunidades de favoritismo y corrupción; resulta fácil ajustarlo, si conviene.
- 2** Si en EE.UU. se estableciera un sistema de comercio de carbono, se le debería dotar de una válvula de seguridad que fijara un tope de precios sobre los derechos de emisión, de tal modo que las compañías pudiesen estimar los costes en que incurrirían. Todos los derechos de emisión comprendidos en el sistema deben ser subastados a fin de evitar el favoritismo político.
- 3** Las naciones industriales han de encontrar el modo de comprometer a las naciones emergentes en procesos de reducción de las emisiones. Esto exigirá conjuntos de reformas estratégicas complejas, adaptadas a las circunstancias específicas de cada país.
- 4** Una actuación realmente eficaz sobre las emisiones tendrá que combinar las políticas de mercado con incidencia climática (tales como los impuestos sobre el carbono y unos planes de transacción de derechos más ingeniosos) con una reglamentación que acelere la adopción de técnicas nuevas.
- 5** Los gobiernos deben formular estrategias activas para inventar y demostrar nuevos sistemas energéticos de gran alcance y baja emisión de gases de invernadero.

de emisión. La industria podría así adquirir una certeza razonable en cuanto a los costes que entrañará el cumplimiento. (En la práctica, al gobierno le bastaría prometer la concesión de derechos adicionales a un precio fijo. Los derechos añadidos probablemente influirán poco en la cantidad total de emisiones producidas; en cambio, la estabilidad de precios lograda aportaría beneficios económicos sustanciales.) Este precio, que en esencia transforma el sistema de comercio de derechos en un impuesto, debe ser lo bastante elevado para enviar a los emisores una señal creíble de que deben invertir en técnicas y prácticas que recorten las emisiones de carbono. Y sea cual fuere el sistema de comercio de derechos, es vital que todos los derechos de emisión salgan a subasta pública. Desde una perspectiva política, tal vez convenga conceder una pequeña parte de los derechos de emisión a grupos de interés cardinales. Pero la atmósfera de nuestro planeta es un recurso público que no debe regalarse a los usuarios.

La tercera recomendación es que los países industriales desarrollen una estrategia más ingeniosa para ganarse la voluntad de los mercados nacientes. Quienes comprenden derechos del mecanismo para un desarrollo limpio —señaladamente, la Unión

Europea y Japón— tienen que convencer, a la junta ejecutiva del mecanismo, de que necesita una reforma profunda. La presión que ejerzan será más eficaz, si además solo admiten en sus mercados domésticos los derechos procedentes del mecanismo para un desarrollo limpio que se basen en niveles de referencia bien establecidos y den origen a reducciones auténticas.

Al planear su política climática, EE.UU. debería imponer normas propias, más estrictas, con respecto a ese tipo de derechos. Y los países de mayor emisión (en torno a la docena) deberían reunirse en un foro ajeno al proceso de Kioto; ahí decidirían estrategias más flexibles y eficaces para que los países en vías de desarrollo se comprometan a desacelerar (y finalmente a rebajar) su producción de emisiones de carbono. Para que el compromiso fuera serio, habría que introducir reformas normativas complejas, adaptadas a la situación de cada país. Reformas que deberían implantarse mediante un trabajo coordinado con los ministerios de finanzas y de industria.

En cuarto lugar, los gobiernos deben aceptar que las señales de precios que da el mercado no bastan para solucionar el problema. Fomentar un uso más eficaz de la energía no solo requiere que los precios sean altos, sino que existan normas y obligaciones relativas a los equipamientos, ya que numerosos usuarios (especialmente los residenciales) no dan suficiente respuesta a las señales de precio por sí solas. Los gobiernos deben alentar el consumo de energías de bajo contenido en carbono, sean de fuentes renovables o no renovables.

Por último, es preciso adoptar estrategias activas para inventar y aplicar técnicas nuevas, como el entierro del CO₂ emitido por las centrales de carbón. La formulación de estos planes deberá hacer frente a la llamada «paradoja del precio». Según el Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica, aunque se aplicaran a los EE.UU. los precios actuales del carbono en Europa, no por ello iba la mayoría de las compañías eléctricas a renovar inmediatamente sus técnicas de generación de energía: en gran parte del territorio, las plantas térmicas de carbón convencionales seguirían costando menos que las avanzadas de carbón, energía nuclear, eólicas o de turbinas de gas natural. El precio de la tonelada de CO₂ tendría que pasar de los 40 dólares para que estimulara la adopción de nuevas técnicas, pero no sería probable que se llegase a ello, por razones políticas. Las soluciones exigirán financiar especialmente la comercialización de técnicas útiles, así como un examen minucioso de los factores que reprimen el cambio, entre los que se cuenta la incertidumbre sobre la normativa que aplicarán los gobiernos a las nuevas centrales de energía. ■

PARA SABER MÁS

Architectures for agreement: Addressing global climate change in the Post-Kyoto World. Preparado por Joseph E. Aldy y Robert N. Stavins. Cambridge University Press, 2007.

Is the global carbon market working? Michael Wara en *Nature*, vol. 445, págs. 595-596, 8 de febrero de 2007.

Promoting low-carbon electricity production. Jay Apt, David W. Keith y M. Granger Morgan en *Issues in Science and Technology*, vol. 23, n.º 3; primavera de 2007.

Climate change legislation design white papers. Comisión de Energía y Comercio, octubre de 2007.

SUSCRÍBETE A INVESTIGACIÓN Y CIENCIA



Ventajas para los suscriptores:

- **Envío** puntual a domicilio
- **Ahorro** sobre el precio de portada
~~82,80 €~~ 75 €
por un año (12 ejemplares)
~~165,60 €~~ 140 €
por dos años (24 ejemplares)
- **Acceso gratuito** a la edición digital de los números incluidos en la suscripción

Y además elige 2 números de la colección TEMAS gratis



www.investigacionyciencia.es/suscripciones

Teléfono: +34 935 952 368

Nathan Fiala se doctoró en la Universidad de California en Irvine con una tesis sobre el impacto ambiental de los hábitos alimentarios. Hoy es profesor en la Universidad de Connecticut.



Alimentación y efecto invernadero

La producción de carne de vacuno para consumo humano acarrea unos costes ambientales sorprendentes: la liberación de cantidades ingentes de gases de invernadero

Nathan Fiala

LA MAYORÍA SOMOS CONSCIENTES DE QUE LOS AUTOMÓVILES, la energía eléctrica generada por carbón y las fábricas de cemento perjudican el medio. Los alimentos que comemos, en cambio, se habían mantenido hasta hace poco al margen del debate ambiental. Sin embargo, según un informe de 2006 de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), los componentes de nuestra dieta y, en concreto, la carne, arrojan más gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, etcétera) a la atmósfera que el transporte o la industria.

Los gases de efecto invernadero captan energía solar y calientan la superficie terrestre. Dado que la potencia de efecto invernadero varía de un gas a otro, el efecto invernadero de un gas se expresa en términos de «equivalentes de CO₂», es decir, la cantidad de dióxido de carbono necesaria para producir un calentamiento global equivalente.

Según el informe de la FAO, los niveles actuales de producción de carne suponen entre un 14 y un 22 por ciento de los 36.000 millones de toneladas del «equivalente de CO₂» de gases de efecto invernadero que se producen anualmente en el mundo. La producción de una hamburguesa de casi 1/4 kg para

un almuerzo (un trozo de carne del tamaño de dos barajas de cartas) libera a la atmósfera la misma cantidad de gases de invernadero que la circulación de un coche de 1400 kg a lo largo de 15 kilómetros.

Todos los alimentos que consumimos, verdura y fruta incluidas, conllevan costes ambientales ocultos: transporte, refrigeración y combustible para el cultivo, así como emisiones de metano de plantas y animales. Todo ello provoca una acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Tomemos por botón de muestra los espárragos: en un informe elaborado para la ciudad de Seattle, el grupo encabezado por Daniel J. Morgan, de la Universidad de Washington, descubrió que cultivar en Perú 1/4 kg de esa hortaliza acarrea la emisión de gases de invernadero equivalentes a 35 g de CO₂ (resultado de la aplicación de insecticidas y abonos, del bombeo de agua y del uso de maquinaria agrícola pesada y de alto consumo de gasolina). Refrigerar y transportar las verduras hasta una mesa norteamericana genera el equivalente a otros 60 g de CO₂ de gases de invernadero. En total, 95 g de equivalentes de CO₂.

Pero eso no es nada comparado con la carne de vacuno. En 1999, Susan Subak, entonces en la Universidad de East Anglia, descubrió que, según el tipo de explotación ganadera, las vacas

EN SÍNTESIS

La producción de vacuno genera gases de invernadero que contribuyen trece veces más al calentamiento global que los gases emitidos por la producción de pollo. En el caso de las patatas el factor es 57.

El consumo de carne de vaca crece a un ritmo vertiginoso debido al crecimiento de la población y al aumento del consumo de carne per cápita.

La producción de la dieta media anual de carne de vaca de un estadounidense emite la misma cantidad de gases de invernadero que la circulación de un coche a lo largo de más de 110 km.



emitían entre 70 y 135 g de metano por cada 450 g de carne de vacuno que producían. Dado que el metano tiene unas 23 veces el potencial de calentamiento global del CO₂, esas emisiones equivalen a liberar a la atmósfera entre 1,6 y 3 kg de CO₂ por cada 450 g de carne de vacuno producida.

El engorde del ganado demanda gran cantidad de comida por unidad de peso corporal. En 2003, Lucas Reijnders, de la Universidad de Amsterdam, y Sam Soret, de la Universidad de Loma Linda, estimaron que para producir 1/4 kg de proteína de carne de vaca son necesarios 4,5 kg de proteína vegetal, con todas las emisiones de gases de invernadero que conlleva el cultivo de cereal. Por último, las granjas producen abundantes residuos que dan origen a gases de efecto invernadero.

Teniendo en cuenta esos factores, Subak calculó que la producción de 1/4 kg de carne de vaca en una explotación intensiva, o CAFO (por sus siglas en inglés), genera el equivalente a unos 6,5 kg de CO₂; más de 36 veces el equivalente de CO₂ de gases de invernadero que emite la producción de espárragos. Ni siquiera otras carnes de consumo igualan el impacto de la de vacuno: la producción de 450 g de carne de cerdo genera el equivalente a 1,7 kg de CO₂; 450 g de pollo el equivalente a 1/2 kg de CO₂. Y aunque el sistema CAFO, económicamente eficiente, no sea el método de producción más limpio en cuanto a emisiones de equivalentes de CO₂, sí es mejor que la mayoría. Los datos de la FAO indican que el promedio mundial de emisiones por la

producción de 1/2 kg de carne de vacuno es varias veces superior al del sistema CAFO.

SOLUCIONES

¿Qué medidas tomar? La mejora de la gestión de residuos y de las prácticas de cultivo reduciría la «huella de carbono» de la producción de carne de vaca. Mediante los sistemas de captación de metano, por ejemplo, se generaría electricidad a partir del estiércol. Pero esos sistemas resultan todavía demasiado caros para convertirse en opciones comercialmente viables.

Todos podemos reducir los efectos de la producción de alimentos en el clima global. Hasta cierto punto, podemos elegir nuestra dieta. Una elección más sabia marcaría la diferencia. El consumo de alimentos de producción local, por ejemplo, reduce la necesidad de transporte; si bien, el transporte ineficiente de alimentos, mediante camiones que llevan cantidades limitadas desde explotaciones cercanas, puede resultar en un ahorro de emisiones de gases de invernadero sorprendentemente bajo. También podría reducirse el consumo de carne, sobre todo de vacuno, en EE.UU. y en el resto del mundo desarrollado.

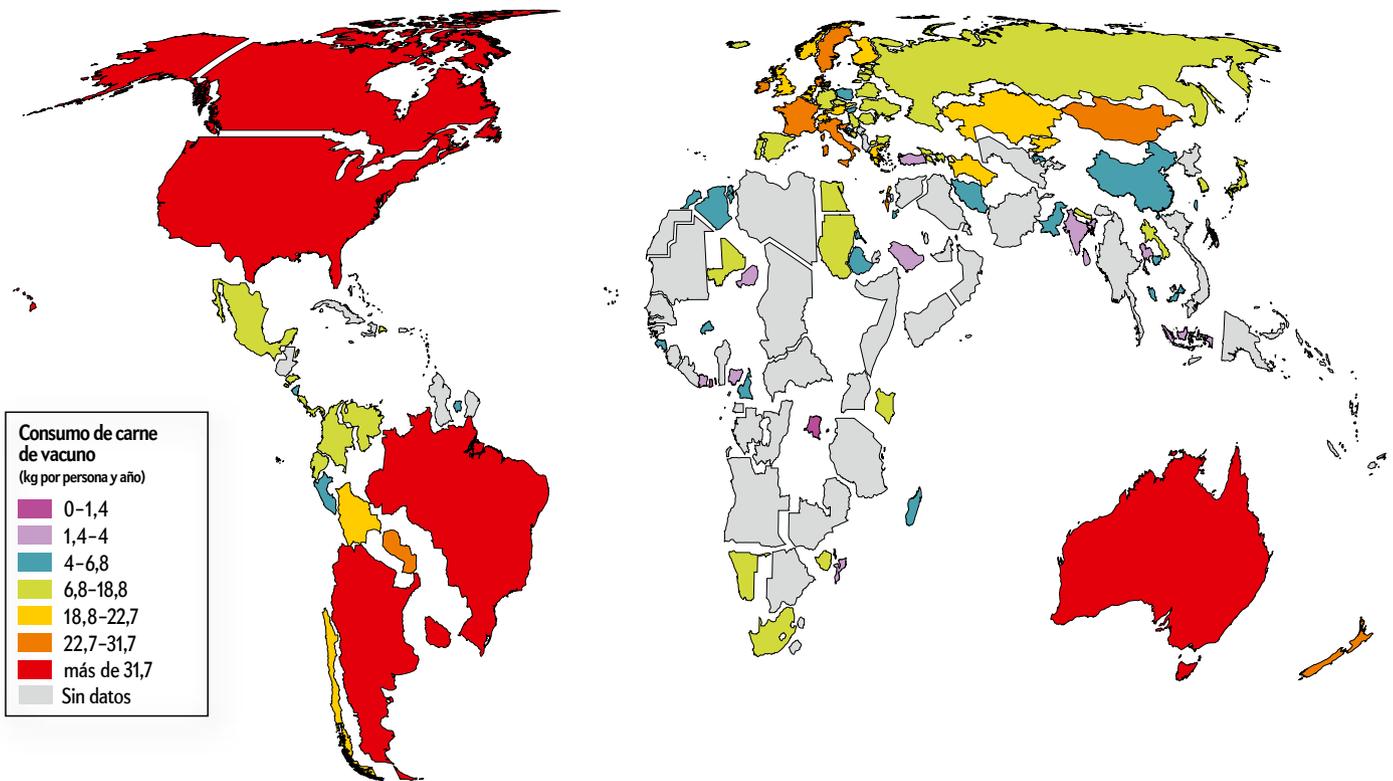
Las gráficas del artículo detallan las conexiones entre la producción de carne de vaca y la emisión de gases de invernadero. La lección es clara: si de verdad queremos limitar las emisiones de gases de efecto invernadero, debemos reflexionar sobre nuestra dieta y sus consecuencias para el planeta. ■

¿Hamburguesa o tofu?

El consumo anual de carne de vacuno per cápita varía entre países: desde los 55 kg de Argentina y los 42 kg de EE.UU. hasta los 450 g de Moldavia; el promedio es de 10 kg por persona y año. Los colores de los países y las distorsiones de su forma reflejan la diferencia entre el consumo de vacuno per cápita

del país y el promedio mundial. El consumo mundial de carne de vacuno per cápita está creciendo, sobre todo en Asia, debido al desarrollo económico: conforme aumentan sus ingresos, la gente compra alimentos que considera más deseables.

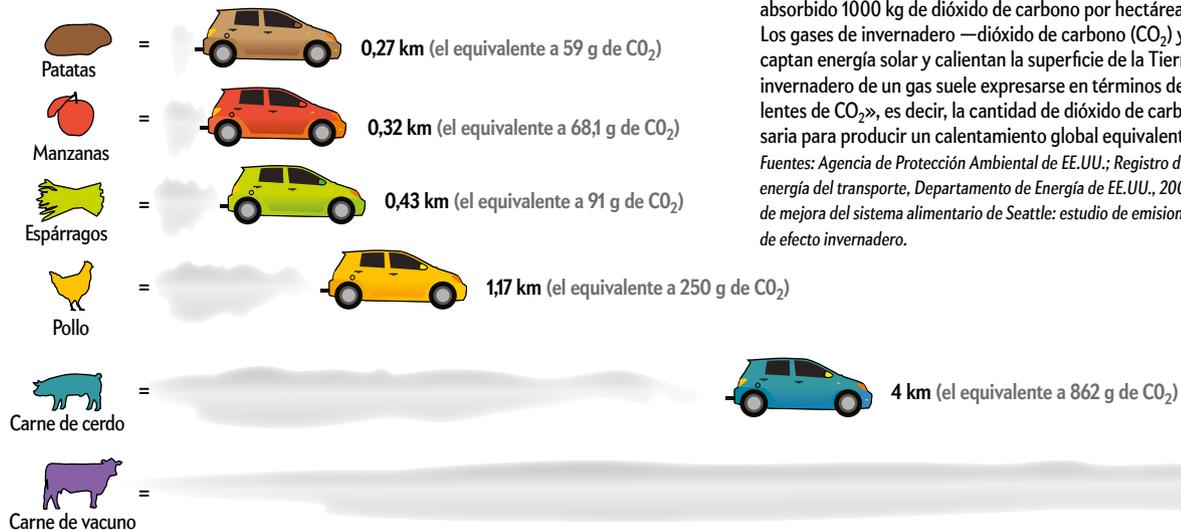
Fuente: ONU, FAO, 2003



Comer y conducir: una comparación atmosférica

Las emisiones de equivalentes de CO₂ por la producción de 1/4 de kg de ...

... igualan las emisiones que se generan al conducir ...



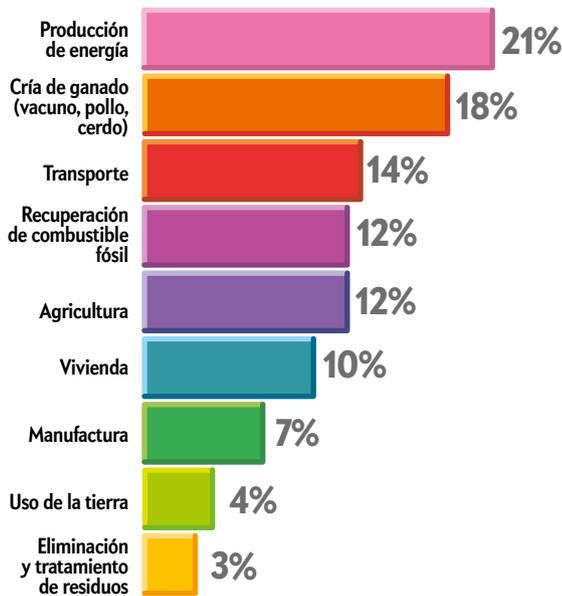
Se pueden comparar las emisiones de gases de invernadero que genera la producción de diversos alimentos con las emisiones de un monovolumen de gasolina que consume 4 litros cada 45 km. Las estimaciones suponen que, de no haberse talado, los bosques y otros tipos de vegetación dedicados a la agricultura habrían absorbido 1000 kg de dióxido de carbono por hectárea al año. Los gases de invernadero —dióxido de carbono (CO₂) y metano— captan energía solar y calientan la superficie de la Tierra. El efecto invernadero de un gas suele expresarse en términos de «equivalentes de CO₂», es decir, la cantidad de dióxido de carbono necesaria para producir un calentamiento global equivalente.

Fuentes: Agencia de Protección Ambiental de EE.UU.; Registro de datos de energía del transporte, Departamento de Energía de EE.UU., 2008; Proyecto de mejora del sistema alimentario de Seattle: estudio de emisiones de gases de efecto invernadero.

El alto coste (en gases de invernadero) de la carne

La producción mundial de carne (vacuno, pollo o cerdo) emite a la atmósfera una cantidad de gases de efecto invernadero mayor que todos los medios de transporte mundial o todos los procesos industriales. Según los datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la base de datos sobre Emisiones para la Investigación Atmosférica Mundial, se estima que los niveles actuales de producción de carne arrojan anualmente a la atmósfera el equivalente a unos 6500 millones de toneladas de CO₂ de gases de efecto invernadero: el 18 por ciento de los 36000 millones de toneladas anuales de emisiones mundiales de gases de invernadero. Solo la producción de energía genera mayor cantidad de gases de invernadero que la cría de ganado para el consumo.

Fuente: FAO ONU, 2006



El total supera el 100 % debido a los redondeos



Un apetito creciente

	Consumo de carne de vacuno en EE.UU. (millones de toneladas)	Equivalente de CO ₂ de gases de efecto invernadero por la producción de carne de vacuno en EE.UU. (millones de toneladas)	Consumo mundial de carne de vacuno (millones de toneladas)	Equivalente de CO ₂ de gases de efecto invernadero por la producción mundial de carne de vacuno (millones de toneladas)
2009 (previsión)	14	210	72	1100
2020 (previsión)	15	230	80	1200
2030 (previsión)	17	250	87	1300
Acumulativo (2009-2030)	340	5000	1800	26.000

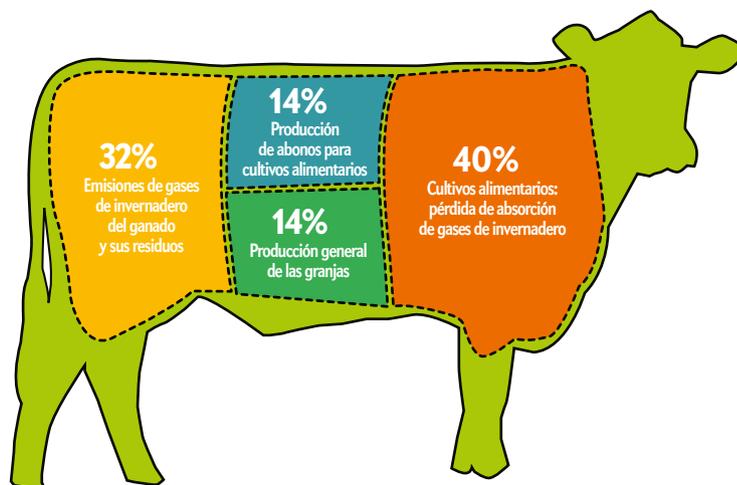
Las cantidades se han redondeado a dos cifras significativas

La producción mundial de carne de vacuno está aumentando a un ritmo de casi el uno por ciento anual. Ello se debe al crecimiento de la población y también a la mayor demanda per cápita. El análisis económico muestra que, si se produjera toda la carne de vacuno en explotaciones intensivas (sistemas de explotación ganadera económicamente eficientes y que generan menos emisiones de gases de invernadero que muchos otros sistemas de cría), la producción de carne de vacuno para 2030 liberaría todavía 1300 millones de toneladas de equivalentes de CO₂ de gases de invernadero. Si las proyecciones actuales de consumo de carne de vaca son correctas, incluso bajo el sistema de producción intensivo el equivalente de CO₂ de gases de efecto invernadero aumentaría en 26.000 millones de toneladas en los próximos 21 años.

Fuentes: FAO ONU; censos oficiales

Cortes de primera: así genera gases de invernadero la producción de carne de vacuno

El mayor porcentaje del efecto invernadero por la producción de carne de vacuno proviene del CO₂ que ya no absorben los desaparecidos árboles, pastos y otras plantas anuales que cubrían el suelo que se dedica ahora a los cultivos alimentarios. El segundo porcentaje más elevado se debe al metano que emiten los residuos de animales y los propios animales cuando digieren la comida. Este análisis del sistema de granjas intensivas de vacuno en EE.UU. lo realizó Susan Subak, entonces en la Universidad de East Anglia.



15,7 km (el equivalente a 3,3 kg de CO₂)



PARA SABER MÁS

Global environmental costs of beef production. Susan Subak en *Ecological Economics*, vol. 30, n.º 1, págs. 79-91, 1999.

Livestock's long shadow: environmental issues and options. H. Steinfeld, P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales y C. de Haan. Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2006.

Meeting the demand: An estimation of potential future greenhouse gas emissions from meat production. Nathan Fiala en *Ecological Economics*, vol. 67, n.º 3, págs. 412-419, 2008.

David G. Victor dirige el Laboratorio de Derecho y Regulación Internacional en la Universidad de California en San Diego.



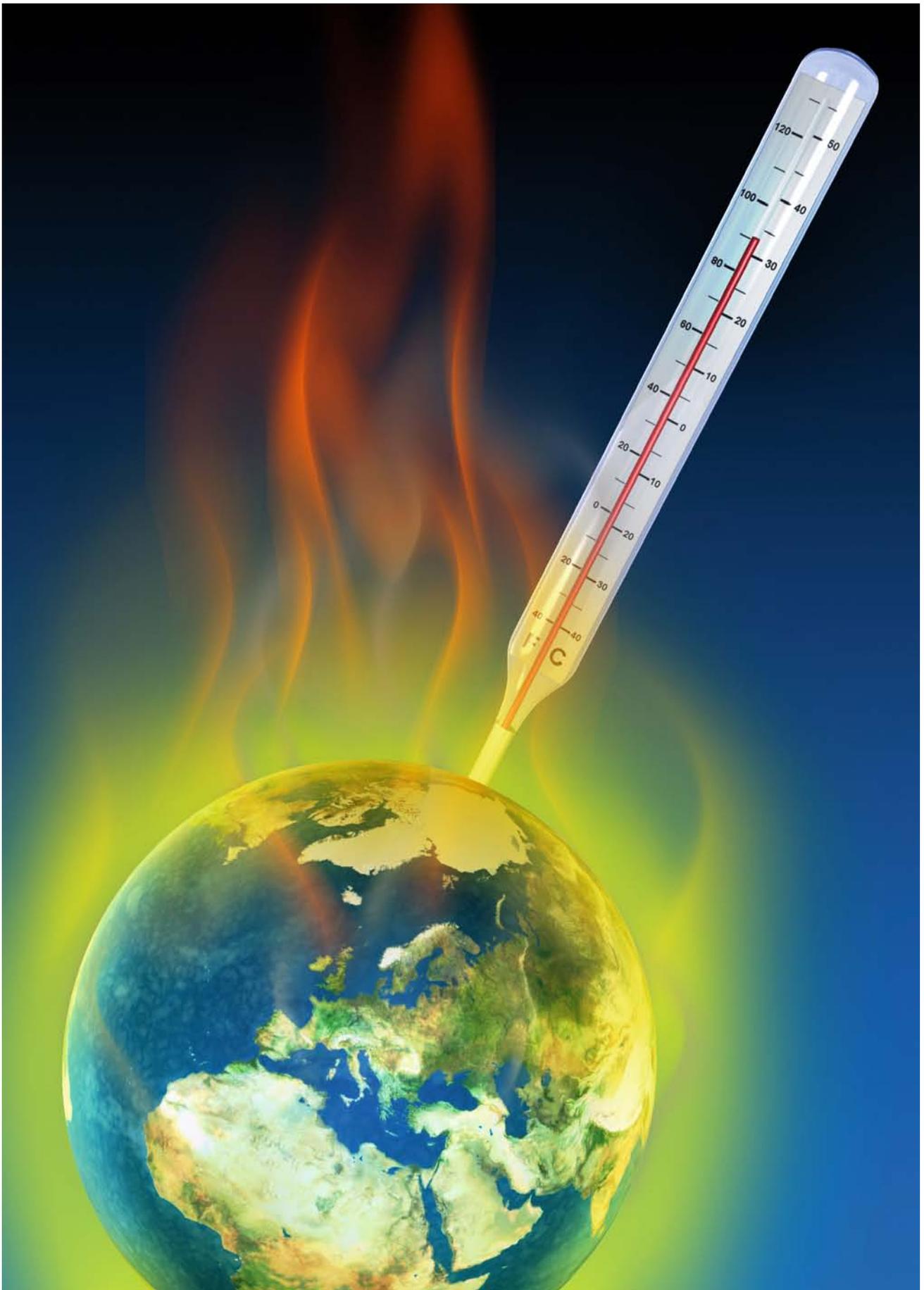
Charles F. Kennel es director emérito del Instituto Scripps de Oceanografía en la Universidad de California en San Diego.

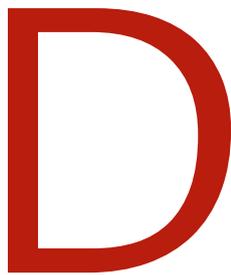


ES HORA DE ABANDONAR EL OBJETIVO DE LOS 2°C

La temperatura media global no refleja el estado de salud del planeta. La política climática debería prestar atención a todo un abanico de signos vitales

David G. Victor y Charles F. Kennel





DESDE HACE CASI UNA DÉCADA, LA DIPLOMACIA INTERNACIONAL se ha centrado en mantener el calentamiento global por debajo de los dos grados Celsius con respecto a los valores preindustriales. Esta meta, tan atrevida como fácil de entender, ha sido aceptada sin crítica y se ha demostrado muy influyente.

En lo tocante a la mitigación de emisiones, el quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) se enmarca en la consecución de dicho objetivo. Lo mismo ocurre con casi cualquier política encaminada a reducir las emisiones de carbono, ya sea en California o en la Unión Europea. A finales de este año tendrá lugar en París la 21.^a Conferencia Internacional sobre Cambio Climático; una vez más, con el objetivo declarado de evitar un calentamiento superior a los 2 °C.

Es hora de que esa osada simplificación se enfrente a la realidad. El objetivo de los 2 °C está desencaminado tanto política como científicamente. Desde un punto de vista político, ha permitido que algunos Gobiernos finjan tomar cartas en el asunto cuando, en realidad, apenas han hecho nada para atenuar el calentamiento global. Y, para evaluar el impacto humano en el clima desde una perspectiva científica, existen mejores indicadores que la temperatura superficial media, básicamente estancada desde 1998 y muy poco relacionada con nada que Gobiernos o empresas puedan controlar de manera directa.

Esa incapacidad para establecer metas de relevancia científica ha provocado que investigadores y políticos lo tengan difícil a la hora de explicar cómo convertir las inversiones en resultados tangibles. Algunas de las reacciones de los «negacionistas» se han basado, en parte, en la obsesión de los legisladores por la temperatura global y en su falta de reacción ante los verdaderos peligros del cambio climático.

Se requieren nuevos objetivos. Para evaluar nuestra influencia sobre el clima y los peligros que ello entraña, debemos prestar atención a todo un abanico de signos planetarios vitales más enraizados en la ciencia. Tales metas deberían también prestar atención a los muchos gases emitidos por la actividad humana, así como a las políticas encaminadas a reducirlos.

OPORTUNISMO POLÍTICO

La dificultad para articular medidas prácticas quedó patente desde el principio. En 1992, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) expresó la necesidad de prevenir «una interferencia antropogénica peligrosa para el sistema climático». Pero todo intento de esclarecer el significado de «peligroso» se ha mostrado inútil, ya que la ciencia ofrece toda una variedad de respuestas según el sector del clima analizado y cada país mantiene su propia perspectiva.

Las Conferencias de las Partes de la UNFCCC celebradas en 2009 y 2010 en Copenhague y Cancún, respectivamente, reformularon el objetivo en términos de un parámetro más concreto: la temperatura media global. La cifra de 2 °C se fijó sin demasiada base científica, pero suponía un punto de referencia simple y

que ya había surgido en otros foros, como los del IPCC, la Unión Europea y el G8. En aquel momento, los 2 °C se antojaban una meta concreta y tal vez asequible.

Desde entonces han surgido dos desagradables problemas políticos. Primero, se trata de un objetivo inalcanzable en la práctica. Los intentos de recortar las emisiones globales han fracasado una y otra vez. Y, con un aumento continuo de la concentración de gases de efecto invernadero, antes o después se superará el umbral de los 2 °C. Una cosa es cierta: los modelos predicen que el calentamiento puede mantenerse por debajo de los 2 °C si las emisiones se reducen de manera drástica en todo el planeta. Pero tales simulaciones parten de presupuestos heroicos, como una cooperación mundial casi inmediata y la disponibilidad generalizada de ciertas técnicas, como la generación de bioenergía con captura de carbono o algunos métodos de almacenamiento que ni siquiera se ha demostrado que funcionen a gran escala.

Dado que el objetivo de los 2 °C parece una meta firme y relacionada con el calentamiento futuro, se ha generado la falsa sensación de que los representantes políticos están tomando medidas para proteger el clima. Y, al simular que luchan por un fin inalcanzable, se han permitido ignorar la necesidad de una adaptación en masa al cambio climático.

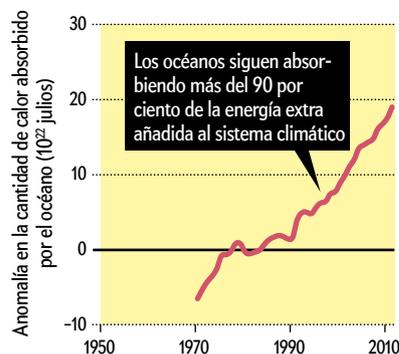
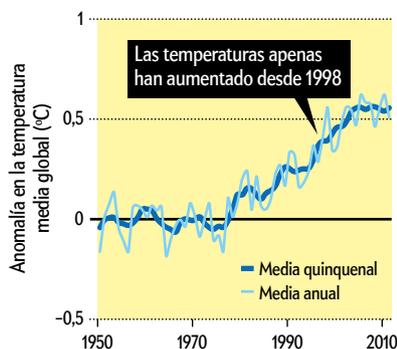
En segundo lugar, el objetivo de los 2 °C no resulta práctico. Tan solo guarda una relación probabilística con las emisiones y las regulaciones legales, por lo que no se traduce en pautas concretas para Gobiernos ni ciudadanos. En otros ámbitos, aquellos fines que han sabido reformularse en términos de acciones específicas y factibles se han mostrado mucho más efectivos. Por ejemplo, los ocho Objetivos del Milenio, adoptados en el año 2000 por las Naciones Unidas para promover el desarrollo en los países pobres, se tornaron útiles cuando se concretaron en 21 propósitos y 60 indicadores cuantificables, prácticos y ligados a las posibilidades de Gobiernos, ONG y organizaciones humanitarias.

DIAGNÓSTICO CIENTÍFICO

La meta de los 2 °C carece de base científica firme. La temperatura media del planeta apenas ha aumentado en los últimos 16 años. Sin embargo, otros datos apuntan a una aceleración del forzamiento radiativo; es decir, la medida en que la acumulación de gases de efecto invernadero está alterando el equilibrio energético del planeta.

Por ejemplo, el Ártico ha experimentado un calentamiento muy rápido, ya que el clima de las latitudes altas es más sensible a las alteraciones climáticas que el del planeta en su conjunto. Y se ha postulado que esa amplificación ártica podría estar causando condiciones meteorológicas extremas en las latitudes medias

INTERCAMBIOS DE CALOR: A pesar de que la temperatura media global ha permanecido casi constante durante los últimos 16 años, las aguas oceánicas profundas han experimentado un calentamiento progresivo. En cada caso, las gráficas muestran las desviaciones con respecto a los valores considerados de referencia.



[véase «El comportamiento anómalo de la corriente en chorro», por Jeff Masters; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2015].

¿Cómo es posible que la presión humana sobre el clima aumente cada vez más rápido y que la temperatura superficial media permanezca estable? Casi con total certeza, la respuesta se halla en los océanos. Estos absorben hasta el 93 por ciento de la energía extra añadida al sistema climático, lo que, entre otros efectos, está provocando la subida del nivel del mar.

Sería maravilloso disponer de un solo índice que diese cuenta de todos los riesgos del cambio climático. Pero tal cosa no existe. En su lugar, necesitamos un conjunto de indicadores sobre los distintos efectos de la actividad humana sobre el clima y sus posibles consecuencias. Los médicos llaman «signos vitales» al cuadro de datos relevantes sobre la salud de un paciente. El clima exige una perspectiva similar.

El mejor indicador ha estado presente todo el tiempo: la concentración atmosférica de CO₂ y del resto de los gases de efecto invernadero (o las variaciones en el forzamiento radiativo provocadas por ellos). Hoy, estos parámetros se encuentran bien determinados por una red internacional de estaciones de seguimiento. Ha de acordarse un objetivo mundial para la concentración media en 2030 o 2050. Después, dicha meta debe traducirse en emisiones y planes de acción concretos y actualizados periódicamente, a fin de que cada Gobierno pueda entender con claridad cuánto contribuyen sus medidas al resultado global.

Algunos contaminantes que alteran el clima, como el metano o el hollín, presentan una enorme variabilidad regional y local, y aún persisten grandes incertidumbres sobre la relación entre las emisiones humanas y la concentración registrada. Algunas iniciativas políticas para mejorar la medición y el control de esos agentes están cobrando impulso. Por ejemplo, los países que integran la Coalición Clima y Aire Limpio están intentando reducir las emisiones de sustancias contaminantes de vida corta.

Asimismo, los responsables políticos deberían prestar atención al calor retenido por los océanos y las temperaturas en las latitudes altas. Dado que la energía almacenada en el fondo del mar se liberará a lo largo de décadas o siglos, el calor absorbido por el océano sí constituye un buen indicador del riesgo que, a largo plazo, deberán afrontar las generaciones futuras y el equilibrio ecológico del planeta. Las temperaturas en las latitudes altas, al ser tan sensibles a los cambios en el clima y al generar alteraciones palpables, también deberían considerarse un signo vital planetario.

TRAZAR EL CAMINO

En última instancia, necesitamos un «índice de volatilidad» que cuantifique el riesgo creciente de eventos meteorológicos extremos; de esta manera, los signos globales guarda-

rían contacto con los aspectos locales que más preocupan a los ciudadanos. Un buen comienzo sería evaluar la superficie total del planeta que, a lo largo del año, presenta condiciones meteorológicas alejadas en más de tres desviaciones estándar de la media local y estacional.

Hay una ventana de oportunidad. A finales de este año, la conferencia de París intentará alcanzar un nuevo acuerdo mundial en la lucha contra el cambio climático. Toda iniciativa sería deberá discutir los costes que entrañan los objetivos de emisiones propuestos, repartir las cargas y diseñar mecanismos de financiación internacional. Pero los diplomáticos deberán ir más allá de la meta de los 2 °C. Y, para ello, los científicos habrán de ayudarles a entender por qué tienen que hacerlo y con qué deberían reemplazar dicho objetivo.

Aunque los nuevos indicadores no estarán listos para la cumbre de París, esta debería marcar el camino para establecerlos. Un mandato internacional claro supondría un estímulo para investigar los indicadores de salud de nuestro planeta, del mismo modo que la Cumbre del Milenio de las Naciones Unidas confirió impulso político a los Objetivos del Milenio. El acuerdo que se alcance en París debería incluir la convocatoria de un congreso científico internacional que busque cómo convertir las mediciones climáticas actuales en los signos vitales de mañana.

Los ciudadanos necesitan entender en qué se gasta su dinero. En ese sentido, los términos «concentración de CO₂» o «calor absorbido por los océanos» no resultan tan efectivos como «temperatura» a la hora de explicar a una persona de la calle dónde está el peligro. Sin embargo, todo paciente entiende que, para prevenir enfermedades o prescribir tratamientos, su médico debe prestar atención a un cuadro completo de signos vitales, como la presión sanguínea, el ritmo cardíaco y el índice de masa corporal. Lo mismo ocurre con nuestro planeta. ■

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 514, págs. 30-31, 2014.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2014

Con la colaboración de **nature**

PARA SABER MÁS

History of the 2 °C climate target. Samuel Randalls en *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, vol. 1, n.º 4, págs. 598-605, julio de 2010.

Global warming gridlock: Creating more effective strategies for protecting the planet. D. G. Victor. Cambridge University Press, 2011.

Distinctive climate signals in reanalysis of global ocean heat content.

Magdalena A. Balmaseda, Kevin E. Trenberth y Erland Källén en *Geophysical Research Letters*, vol. 40, n.º 9, págs. 1754-1759, mayo de 2013.

JUDITH CURRY ha estado en el centro de un agrio debate entre climatólogos.



Michael D. Lemonick, es editor de opinión en *Scientific American*. Ha sido redactor científico en el centro de estudios independiente y sin ánimo de lucro Climate Central y, durante más de 20 años, redactor científico para la revista *Time*.



Escépticos frente a ortodoxos

¿Cabe esperar una conversación civilizada sobre el cambio climático?

Michael D. Lemonick

AL TRATAR DE COMPRENDER LA CONTROVERSIA QUE ha rodeado a Judith Curry, resulta tentador inclinarse por una de las dos argumentaciones más cómodas. Curry, directora de la Escuela de Ciencias de la Tierra y la Atmósfera del Instituto de Tecnología de Georgia, es conocida por sus investigaciones sobre los huracanes o la dinámica de los hielos árticos, entre otros temas. Desde hace algo más de un año, sin embargo, es mencionada a menudo por una causa que molesta, si no enfurece, a muchos de sus colegas de profesión: Curry ha mantenido un diálogo activo con la comunidad de escépticos del cambio climático, sobre todo a través de blogs como *Climate Audit*, *Air Vent* o *Blackboard*. Y, en el camino, ha acabado por cuestionar las reacciones de los climatólogos ante quienes dudan de su ciencia, con independencia de lo asentada que esta se encuentre. Es cierto que numerosos escépticos no hacen sino reciclar críticas refutadas hace tiempo, pero otros, opina Curry, plantean objeciones válidas. Al echarlas todas en el mismo saco, los expertos no solo están desperdiciando una ocasión para depurar su ciencia, sino que proyectan una imagen altiva y engreída ante a la opinión pública. Según Curry: «Es cierto que se dicen muchas excentricidades, pero no todo lo es. Aunque solo un uno o un diez por ciento de las objeciones fuesen legítimas, habríamos hecho bien [en considerarlas], porque nos hemos dejado lastrar demasiado tiempo por un pensamiento de grupo».

Curry reserva sus críticas más feroces para, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). Para casi todos los expertos, los informes que cada cinco años publica el organismo de las Naciones Unidas representan el consenso en climatología. Pocos afirmarían que el IPCC es perfecto, pero Curry opina que necesita una reforma sustancial y lo tacha de corrupto. «No voy a criticar al IPCC para respaldarlo después. Su proceder no me merece suficiente confianza», explica. Si afirmaciones semejantes se rumoreasen en congresos o salas de reuniones, se entenderían como parte de las discrepancias inherentes a una ciencia en proceso de maduración. Pero, pronunciadas en los mismos foros que en noviembre de 2009 difundieron la correspondencia privada de lo que dio en llamarse *Climategate*, han sido tachadas de traición por muchos.

Su caso ha dado pie a dos explicaciones contrapuestas; ambas, a primera vista, igualmente plausibles. La primera presenta a Curry como una mediadora, alguien capacitada para llevar el debate por cauces más civilizados y para dirigir al público hacia actuaciones razonables: un reconocimiento sincero de los errores propios y un trato respetuoso hacia los escépticos debería resultar positivo. La versión alternativa sostiene que se ha dejado embaucar y que sus esfuerzos bienintencionados solo han servido para arrojar más leña al fuego. Según esta opinión, tender puentes carece de sentido, puesto que es imposible convencer a los escépticos. Además, estos se han excedido más allá de lo tolerable para llevar sus argumentos al público. En lugar de

EN SÍNTESIS

La hostilidad entre la corriente ortodoxa en climatología y la comunidad de escépticos del cambio climático impide un diálogo que, según algunos expertos, podría resultar beneficioso.

Tras el Climategate y algunas acusaciones al IPCC, la opinión pública se encuentra más desconcertada que nunca, sobre todo en lo referente a las incertidumbres que rodean al futuro del clima.

Es importante entender que, en ciencia, incertidumbre no significa lo mismo que ignorancia. La ciencia es, más bien, una metodología para cuantificar lo desconocido.

Los climatólogos deben aprender a comunicar a la opinión pública lo que entienden por márgenes de error y han de saber responder a las críticas de quienes no comparten sus teorías.

tratar el debate en congresos o a través de prensa científica especializada, se han dedicado a difundir correspondencia privada, robada de ordenadores personales. Si la disciplina fuese cosmología o paleontología, la interpretación de los hechos no importaría demasiado. Pero el caso de la climatología es otro. La mayoría de los expertos coincide en que, para evitar un desastre en potencia, harán falta cambios de calado en la agricultura y en el modelo de producción energética, entre otros.

Así las cosas, perfilar con acierto el debate público puede convertirse en una cuestión de supervivencia. Si nos proponemos adoptar medidas serias, el momento es ahora. Cualquier retraso provocará que los esfuerzos para evitar o posponer un gran cambio climático resulten mucho más caros y difíciles. En diciembre de 2009, sin embargo, la Conferencia Internacional sobre Cambio Climático en Copenhague se saldó con un documento descafeinado que no imponía restricciones legales a las emisiones de gases de efecto invernadero. En consecuencia, el Senado de los EE.UU. ni siquiera logró aprobar una modesta ley de comercio de derechos de emisión de CO₂. Por otra parte, como resultado del *Climategate* y de las críticas contra la climatología en general y contra el IPCC en particular, la opinión pública se encuentra más desorientada que nunca. ¿Está Curry mejorando o empeorando la situación?

CAMBIO DE PERSPECTIVA

La travesía de Curry comenzó con un artículo del que era coautora y que fue publicado en *Science* en 2005. En él, se vinculaba el aumento en la intensidad de los ciclones tropicales con el calentamiento global. El trabajo le valió críticas feroces en los blogs de la comunidad escéptica, que argumentaba que adolecía de deficiencias graves en las estadísticas sobre huracanes, sobre todo en las referentes al período anterior a 1970. Además, la investigación habría ignorado los efectos derivados de la variabilidad natural. Según Curry: «En términos generales éramos conscientes de esos problemas. Pero los críticos sostenían que su importancia era mucho mayor».

Curry no compartía necesariamente esos reproches, pero en lugar de desestimarlos, como muchos científicos habrían hecho, comenzó a debatir con los críticos. «El primer autor del artículo, Peter J. Webster, apoya mis conversaciones con los escépticos», añade Curry. «Ahora mantenemos un trato muy cordial con Chris Landsea, con quien nos enfrentamos entre 2005 y 2006, y hemos discutido con Pat Michaels sobre el asunto». Curry participó en un blog dirigido por Roger Pielke, Jr. (profesor de estudios ambientales en la Universidad de Colorado que ha mostrado con frecuencia su desacuerdo con la corriente imperante en climatología), así como en *Climate Audit*, gestionado por Steve McIntyre, estadístico. Curry añade que este blog se convirtió en su favorito: «Sus temas me parecieron muy interesantes y pensé: “En lugar de predicar otra vez a los conversos de *RealClimate* [el blog ortodoxo por excelencia], esta es la gente a la que quiero llegar»».

Fue entonces cuando Curry comenzó a respetar a los críticos, o al menos a algunos de ellos. Eso la condujo a reconsiderar la defensa incondicional del IPCC que había mostrado durante años. «Reconozco que me dejé llevar por cierto pensamiento de grupo», explica Curry. Con ello no se refiere al artículo sobre huracanes en particular, sino a la costumbre de aceptar, sin más, la idea de que los informes del IPCC constituyen las opiniones más certeras sobre el cambio climático.

Curry afirma que siempre confió en que el IPCC sabría manejar las múltiples y dispares ramificaciones de esta compleja y

polifacética disciplina científica. «Mi confianza en el informe del Grupo de Trabajo 1 del IPCC era casi total», añade. Pero ya entonces albergaba algunas dudas. Había apreciado cierta falta de rigor en áreas en las que ella era experta, como la nubosidad o los hielos marinos. «Fui revisora del Tercer Informe de Evaluación en lo tocante a los aerosoles atmosféricos [partículas como el polvo o el hollín, que afectan a la formación de nubes]. Les dije que su planteamiento era muy simplista y que ni siquiera mencionaban los efectos de los aerosoles en la formación de nubes. No se trataba de errores, sino más bien de ignorancia no reconocida y una confianza exagerada». En retrospectiva, dice riendo: «Si había expertos en otras áreas que viajaban en el mismo barco, el asunto da que pensar».

Parece que fueron pocos quienes opinaron lo mismo. De los centenares de científicos que participaron en el informe de 2001, se cuentan con los dedos quienes proclamaron que sus tesis habían sido ignoradas (por más que el informe nunca hubiera reflejado a la perfección los planteamientos de cada uno de los expertos). Aun así, una vez que Curry comenzó a indagar en los blogs de la comunidad escéptica, las cuestiones planteadas por algunos de los críticos más agudos (entre quienes se incluían estadísticos, ingenieros y creadores de simulaciones informáticas procedentes de la industria) contribuyeron a concretar sus propias dudas. «No afirmo que los principios científicos del IPCC fuesen erróneos, pero ya no me siento en la obligación de reemplazar mis conclusiones por las del IPCC», afirmaba en el blog *Collide-a-Scape*.

Curry fue encontrando más ejemplos en los que, según su opinión, el IPCC estaba «retorciendo» la ciencia: «Un directivo de una de las grandes instituciones de modelización climática me contó que los investigadores parecían dedicar el 80 por ciento de su tiempo a ejecutar simulaciones para el IPCC, y solo el 20 por ciento a desarrollar modelos mejores». Afirma también que el IPCC ha infringido sus propias normas al haber aceptado artículos que no han sido revisados por expertos; además, ha nombrado altos cargos a científicos con relativa poca experiencia, que, eso sí, alimentan la «narrativa» de la organización sobre el terrible destino que se nos avecina.

Quienes niegan o cuestionan el cambio climático se han aferrado a las declaraciones de Curry para poner en entredicho las bases científicas de la climatología. Es importante subrayar que nada de cuanto Curry haya observado la ha llevado a cuestionar los aspectos científicos; que tampoco pone en duda el calentamiento del planeta, y que considera que el fenómeno obedece, en gran medida, a nuestras emisiones de gases de efecto invernadero, incluido el dióxido de carbono. También reconoce que, en caso de que la situación evolucionase hacia el peor de los escenarios posibles, las consecuencias serían catastróficas. No piensa que los correos interceptados en el *Climategate* constituyan indicios de fraude ni que el IPCC sea fruto de una gran conspiración internacional. Lo que sí cree es que, tras bajar de su torre de marfil, la climatología ortodoxa se ha instalado en una fortaleza ideológica cuyos moradores se consideran infalibles y en la que los foráneos tienen prohibida la entrada.

CIENCIA E INCERTIDUMBRE

Curry no se encuentra sola en sus críticas contra el IPCC. Tras el *Climategate*, un error en un informe del IPCC sobre la fusión de los glaciares, sumado a las acusaciones de conflicto de intereses contra su presidente, Rajendra K. Pachauri, provocó la intervención de diversos organismos, desde las Naciones Unidas y el Gobierno británico hasta universidades a ambos lados del Atlántico.

co. Ninguno de ellos halló pruebas de práctica fraudulenta. Tampoco lo hizo el Consejo Interacadémico (IAC), una red integrada por academias de las ciencias de todo el mundo. Pero aunque no halló errores o distorsiones de calado, afirmó que los procedimientos del IPCC no se habían adaptado a los tiempos y que, en ciertos casos, el organismo no había aplicado con rigor sus propias normas.

Declaraciones polémicas aparte, el origen de las preocupaciones de Curry coincide con el problema al que se enfrenta la climatología cuando intenta convertir sus conclusiones en medidas concretas sobre política ambiental. La opinión pública desea saber si el planeta se está calentando o no, en qué medida lo hace y cuán graves serán las consecuencias. Pero las respuestas de los científicos vienen envueltas en un lenguaje de apariencia vaga, que se expresa en probabilidades y niveles de confianza. Por tratarse de una cuestión con una fuerte carga política, algunos expertos se muestran reacios a mencionar al público nada que tenga que ver con incertidumbres. Temen que cundan ejemplos como el del senador de Oklahoma James Inhofe, quien calificó el cambio climático como «la mayor estafa jamás perpetrada contra el pueblo estadounidense». Inhofe y otros escépticos con motivaciones políticas continúan empleando las incertidumbres como arma arrojadiza para atacar a la climatología en conjunto: dado que los científicos no lo saben todo, no saben nada.

Los márgenes de error afectan tanto al clima del pasado como a los pronósticos sobre el clima futuro. Curry afirma que los expertos no han sabido manejar la incertidumbre en sus cálculos, y que ni siquiera pueden determinar con precisión el que, posiblemente, constituye el coeficiente más importante de todos los modelos: el forzamiento radiativo del CO₂; es decir, el aumento de temperatura que, de manera aislada, provocaría una concentración del CO₂ atmosférico doble a la actual (sin tener en cuenta la fusión del hielo, la retención atmosférica de vapor de agua, ni docenas de otros factores).

Curry argumenta que las dificultades se multiplican cuando se intentan incluir todos los efectos en las predicciones para el próximo siglo, ya que también se encuentran plagados de incertidumbres. «Hay gran cantidad de incógnitas que ni siquiera sabemos cómo cuantificar, pero que deberían incluirse en el cálculo del nivel de confianza». Un ejemplo lo proporciona el «palo de hockey», el gráfico de temperaturas que muestra que las temperaturas actuales son las más elevadas desde hace cientos de años. Para afirmar que este año o aquel decenio han sido los más cálidos, habría que conocer con certeza las temperaturas reales a lo largo de todos esos siglos. Y Curry, a la par que numerosos escépticos, no piensa que nuestro conocimiento al respecto sea tan sólido.

Muchos climatólogos consideran injustas esas críticas. Afirman que el IPCC siempre ha sido franco en lo referente a las incertidumbres y que sus informes mencionan con detalle los puntos conflictivos. Sería irresponsable ofrecer respuestas taxativas a preguntas como cuánto aumentarán las temperaturas o cuánto subirá el nivel del mar. En su lugar, se cuantifican los niveles de confianza. Y lo que es más importante: otros expertos disienten de Curry acerca del efecto de las incertidumbres en los resultados finales. Sí, es cierto que el coeficiente más importante de la climatología no se conoce con absoluta precisión, reconocía poco antes de fallecer, en julio de 2010, Stephen H. Schneider, profesor de biología ambiental y cambio climático en la Universidad de Stanford. Pero su incertidumbre no pasa de algunos puntos porcentuales, por lo que no sesga los pronósticos de forma importante. Otros efectos, como si la nubosidad va a acele-

Comprender las tendencias

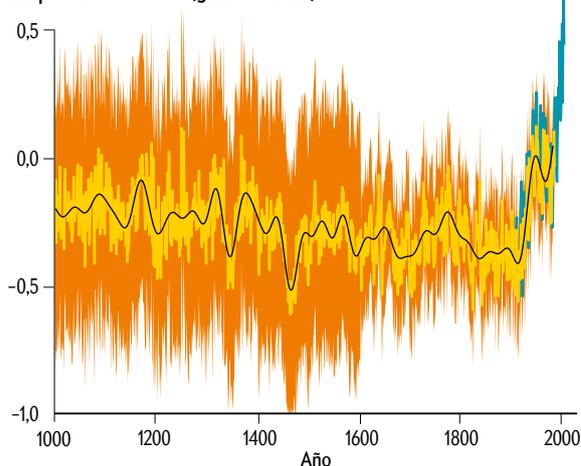
Algunas cuestiones importantes en climatología son problemáticas, pues dependen de mediciones indirectas o de datos incompletos. Las incertidumbres que se derivan de ello suelen hacerse explícitas, pero la sola existencia de márgenes de error a menudo genera confusión. Los gráficos siguientes ilustran dos ejemplos controvertidos.

Reconstruir el pasado

En el Tercer Informe de Evaluación del IPCC, de 2001, se ofrece un gráfico de temperaturas que se remonta nada menos que 1000 años atrás. La línea se eleva bruscamente en los últimos decenios: es el llamado «palo de hockey». Los intervalos de confianza (naranja) son mayores en el pasado debido a la falta de mediciones directas de temperatura. Los datos se han deducido a partir de los anillos de los árboles, el crecimiento de corales, perforaciones en el hielo y otros procedimientos. La probabilidad de que la temperatura real se hallase dentro de los intervalos de confianza señalados es del 95 por ciento.

- Mediciones directas
- Datos reconstruidos (anillos de árboles, corales, núcleos de hielo, registros históricos)
- Promedio (cada 50 años)
- Márgenes de error (95 por ciento de nivel de confianza)

Desviaciones de la temperatura con respecto a la media del período 1961-1990 (grados Celsius)



Pronosticar el futuro

Cuando el IPCC publicó su Cuarto Informe de Evaluación en 2007, contenía una estimación de la elevación futura del nivel de mar en la que, a falta de datos sobre la dinámica de los glaciares, excluyó ese factor. El IPCC daba unas cotas de elevación «verosímil» (donde «verosímil» se definía como una probabilidad del 66 por ciento). Una revisión posterior basada en nuevos datos duplicaba con holgura los pronósticos de 2007.

Elevación prevista del nivel del mar en 2100 (centímetros)

18-59
Sin incluir el efecto de los glaciares (IPCC, 2007)

80-200
Incluyendo el efecto de los glaciares (Pfeffer, 2008)

rar o a retardar el calentamiento global, son mucho más imprecisos, pero el IPCC siempre lo ha admitido, apuntaba Schneider, quien hace diez años persuadió al IPCC para que sistematizase su tratamiento de las incertidumbres. «Últimamente hemos visto a muchos testaferros de Judy», afirmaba Schneider. «Resulta espantoso ver cómo una científica tan competente parece adoptar unas opiniones tan poco rigurosas. No encuentro explicación a semejante conducta.»

Pero los críticos no parecen los únicos faltos de rigor. Aunque la inspección de la IAC declaró su respeto por el IPCC, objetó la manera en que la organización trataba las incertidumbres. Según Harold Shapiro, antiguo rector de la Universidad de Princeton y director de la comisión inspectora: «Examinamos con sumo detalle su manera de comunicar a los responsables políticos los grados de incertidumbre. A nuestro entender, hubo de

todo. Algunas veces se hizo de la manera correcta. Otras, no tanto. Había aseveraciones que expresaban gran confianza con muy pocas pruebas y ocasiones en que se hacían afirmaciones que no eran falsables». Los enunciados cuya falsedad resulta imposible de verificar no se consideran científicos.

Sin embargo, existe al menos un aspecto en el que Curry se halla en sintonía con sus compañeros de profesión. La opinión pública ha de comprender que, en ciencia, incertidumbre no es lo mismo que ignorancia. Más bien, la ciencia constituye una manera de cuantificar lo desconocido. Curry ha tratado de iniciar un diálogo sobre una de las cuestiones más difíciles e importantes en política ambiental: en qué medida la ciencia puede ofrecer información válida aunque existan lagunas en el conocimiento. «Si no podemos expresarnos en el lenguaje de las distribuciones de probabilidades, nos vemos forzados a recurrir

POLÍTICA

Cómo afrontar un destino incierto

Es hora de abandonar la fantasía de que el primer paso consiste en alcanzar un acuerdo global

M. GRANGER MORGAN

Todos tomamos decisiones basadas en informaciones inciertas una y otra vez. Decidimos qué estudiar, cuál será nuestra profesión, con quién nos casaremos y si vamos a tener hijos o no a partir de datos incompletos e inciertos. La situación de los gobiernos no es distinta. Pueden financiar el transporte, poner en práctica políticas sociales, declarar la guerra o firmar la paz, pero nunca saben con total certeza cuáles serán los resultados.

Aunque existen numerosas incertidumbres respecto al cambio climático, sabemos mucho más sobre cómo responderá el planeta a un incremento sustancial de la concentración de dióxido de carbono atmosférico que sobre muchos de los problemas a los que nos enfrentamos en nuestra vida privada o en la política. La actividad humana durante los dos últimos siglos ha puesto al planeta en un riesgo enorme. Si no actuamos pronto para cambiar nuestro modelo energético y para reducir nuestras emisiones de gases de efecto invernadero, en este siglo nuestros hijos y nietos presenciarán cambios profundos en los ecosistemas y en el clima. Algo que pondría en peligro no solo nuestra forma de vida, sino la supervivencia de miles de millones de personas en los países en desarrollo. Aunque los climatólogos y asesores deberían ser más cuidadosos y explícitos cuando se dirigen al público, no son las incertidumbres científicas lo que impide avanzar en cuestiones políticas.

Lo primero que deberíamos hacer es dejar de lado la idea de que todos los países han de ponerse de acuerdo antes de que cualquiera de ellos se tome en serio una reducción en las emisiones de carbono. De lo contrario, el

retraso se contará en decenios. Debemos seguir buscando acuerdos internacionales, pero con énfasis en que son las naciones, a modo individual, quienes deben adoptar medidas con prontitud. Debemos desarrollar



estrategias internacionales que integren diferentes políticas de control de emisiones en acuerdos de mayor alcance e inducir a los rezagados a subir a bordo, ya sea mediante argumentos morales o a través de la imposición de tasas aduaneras a sus importaciones.

Es necesario acabar con la actitud mental de «o ellos, o nosotros». Es cierto que el primer mundo se ha beneficiado de siglos de desarrollo gracias a las emisiones ilimitadas de gases de efecto invernadero. Pero ¿ha estado usted en China, India o Brasil hace poco? Todos sus aviones, teléfonos móviles, automóviles y ordenadores son también una consecuencia de aquellos años de desarrollo. Gracias a que pueden permitírselo, son los países del primer mundo quienes tienen la

obligación de tomar la iniciativa en el control de sus emisiones. Pero los límites de la responsabilidad no están tan bien definidos como muchos creen. Millones de individuos de elevada posición social en los países emergentes generan emisiones tan graves como las de cualquiera. No deberían tener las manos libres.

Por último, es necesario que el público comprenda algunos aspectos fundamentales. En un estudio que mis colaboradores y yo publicamos hace quince años en la revista *Risk Analysis* y que hemos repetido este año, descubrimos que gran parte de la población no entiende la diferencia entre clima y tiempo, y que siguen siendo mayoría quienes ignoran que la combustión de carbón, petróleo o gas natural constituye la principal causa del cambio climático. La educación no será sencilla, porque son muchos los poderes económicos que invierten miles de millones para proteger sus intereses a corto plazo y mantener al público desorientado. Además, el *Climategate* se ha utilizado para aumentar la confusión.

Hicieron falta décadas para despejar las dudas sobre la relación entre tabaco y cáncer. Si no actuamos pronto para reducir de manera drástica las emisiones de carbono, dentro de unos cuantos decenios podemos vernos encarrilados hacia la catástrofe. No tenemos, desde luego, una certeza total. Pero el peligro es real y los pronósticos no son favorables.

M. Granger Morgan es director de ingeniería y política pública en la Universidad Carnegie-Mellon y director del Centro de Decisiones sobre el Clima.

a símiles, como ruletas o lanzamientos de dados», explica Chris A. Forest, estadístico de la Universidad estatal de Pennsylvania. Y por ser la climatología una ciencia compleja, añade, expresiones como «verosímil» o «con una alta probabilidad», a las cuales recurren los informes de IPCC, condensan en una palabra muchos lanzamientos de dados, efectuados a la vez y acoplados unos con otros. Cuando los científicos traducen su jerga al lenguaje ordinario, incurren por necesidad en grandes simplificaciones; eso da la impresión de que se ignoran matices y hace que la opinión pública se forme versiones caricaturescas de las teorías sobre el clima.

Una lección crucial que es preciso comunicar al público es que la incertidumbre es un arma de doble filo. Cuando la ciencia adolece de imprecisiones, las consecuencias pueden ser mejores de lo que indican los pronósticos, pero también peores. Las previsiones sobre el aumento del nivel de mar representan un buen ejemplo. Resulta fácil estimar la rapidez con que se fundirá el hielo que cubre Groenlandia o la Antártida a medida que aumenten las temperaturas, así como el incremento del nivel del mar que provocará toda esa agua. Pero el calentamiento también podría afectar a la velocidad con que las lenguas de hielo de los glaciares fluyen hacia los océanos y forman icebergs, que también elevan el nivel del mar. La predicción de este segundo efecto se antoja más difícil. Como explica Curry: «No sabemos cómo cuantificarlo, por lo que ni siquiera lo incluimos en nuestros modelos».

En lugar de esconder bajo la alfombra las incertidumbres sobre las lenguas de hielo, como las críticas de Curry podrían hacer pensar, el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, fechado en 2007, las hace explícitas. En concreto, el informe pronostica entre 0,18 y 0,59 metros de elevación del nivel del mar a finales del siglo XXI, pero excluye la posibilidad de un incremento en el flujo de hielo. Según el documento, si bien tales incrementos resultaban verosímiles, en el momento de su preparación no existía información suficiente para determinarlos. Investigaciones posteriores han arrojado algo de luz sobre el asunto (si bien los autores reconocen que sus previsiones aún exhiben un margen de error importante). Al parecer, los pronósticos de 2007 quizás hayan sido demasiado optimistas.

Lo mismo se aplica a otros aspectos. «El más nefasto de los escenarios posibles podría ser peor que cualquiera que imaginemos en este momento», reconoce Curry. El aumento de temperatura provocado por una duplicación del CO₂ «podría ser de un grado. Pero quizá sean diez. Hemos de considerar todas las opciones, desarrollar políticas para todos los supuestos y efectuar un análisis de costes y beneficios para todos ellos; entonces empezaremos a deducir conclusiones con sentido».

DAÑAR LA IMAGEN

No cabe duda de que Curry ha generado polémica. A menudo es citada por algunos de los escépticos más ásperos, como Marc Morano, antiguo asesor del senador Inhofe y fundador del blog *Climate Depot*. Pero no solo él: Andrew C. Revkin, comentarista veterano de ecología en *The New York Times*, ha tratado a Curry con gran respeto en su blog *Dot Earth*. Otro tanto ha hecho Keith Kloor, que gestiona *Collide-a-Scape*, un blog que se esfuerza decididamente por ser imparcial.

A los expertos les preocupa que la notoriedad de Curry ponga en peligro el consenso sobre cambio climático alcanzado a lo

largo de los últimos 20 años. Y, aun suponiendo que fuera posible, no ven un beneficio claro en convencer a los escépticos. Según Gavin A. Schmidt, climatólogo de Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA y dueño del blog *RealClimate*: «La ciencia no es una campaña electoral. No tenemos por qué convertirnos en el mejor amigo de todo el mundo».

Para Curry, el peligro no proviene de las críticas de los escépticos, cuestionables en su mayor parte. El peor menoscabo tiene su origen en la dura respuesta que la comunidad científica ofrece a esas críticas —al igual que muchos fallecimientos por gripe no se deben al virus, sino a una reacción exagerada del sistema inmunitario—. Curry subraya que ella misma ha sido víctima de ese proceder, si bien añade que no ha sufrido daños profesionales y que continúa publicando. «La comunidad la ha criticado con dureza por no observar la fetua [opuesta a dialogar con los escépticos]», afirma McIntyre.

No faltan comentaristas imparciales que estén de acuerdo. Uno de ellos es S. Alexander Haslam, experto en psicología de la organización en la Universidad de Exeter. La comunidad de climatólogos, afirma, ha caído en el síndrome de la oveja negra: a los miembros de un grupo les hieren las críticas formuladas por los ajenos a la comunidad, pero reservan sus peores iras para los díscolos surgidos en el seno del grupo. Al tratar a Curry como a una paria, prosigue Haslam, fortalecen su reputación,

pues hacen de ella una especie de disidente que le canta las verdades al poder. Incluso si Curry estuviera radicalmente equivocada, no les conviene en absoluto tratarla como un mero fastidio ni como una distracción: «A mi entender, sus críticas están siendo perniciosas. Pero, de alguna manera, se trata de una consecuencia de nuestra incapacidad para reconocer que toda ciencia conlleva una dinámica de carácter político».

En cierto sentido, ambas explicaciones sobre la conducta de Judith Curry (¿una mediadora o una ingenua burlada?) son correctas. Los climatólogos se sienten atacados por una caza de brujas motivada por intereses políticos. Y, en ese ambiente enrarecido, el proceder de Curry ha sido interpretado como una traición, sobre todo cuando los escépticos se han aferrado a las críticas de Curry para hacer ver que siempre tuvieron razón. Pero Curry y los escépticos no carecen de motivos para sentirse agraviados: se sienten arrojados al vertedero de los extravagantes, sin la menor consideración hacia sus argumentos. La cuestión ha derivado en una chapucería política. Lo que podrían ser debates habituales sobre datos, metodologías o conclusiones se han convertido en exabruptos. No parece razonable esperar que todos desistan de atacar al contrario, pero, dada la importancia de lo que está en juego, es vital centrarse en la ciencia y no en el ruido. ■

La
incertidumbre
es un arma
de doble filo.
El futuro puede
ser mejor que
los pronósticos,
pero también
peor

PARA SABER MÁS

Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. Los cuatro informes de evaluación del IPCC se encuentran disponibles en www.ipcc.ch
RealClimate.org se define como «un foro sobre el cambio climático a cargo de climatólogos en activo para periodistas y el público». Uno de sus moderadores es Gavin A. Schmidt.
ClimateAudit.org es un blog escéptico a cargo de Steve McIntyre, estadístico.

Amory B. Lovins es director del Instituto de las Montañas Rocosas (Colorado).



MÁS RIQUEZA CON MENOS CARBONO

Si primásemos la eficiencia energética,
no solo protegeríamos el clima.
Empresas y consumidores percibirían
beneficios económicos

Amory B. Lovins

UN MALENTENDIDO DESVIRTÚA EL DEBATE ACERCA del clima. Los expertos que hablan en nombre de uno u otro lado durante la disputa sostienen que la protección del clima obliga a un compromiso entre el ambiente y la economía. Creen que al quemar menos combustibles fósiles para refrenar o impedir el calentamiento global aumenta el coste de satisfacer las demandas energéticas de la sociedad. Afirman los ecologistas que el coste sería un poco mayor, pero valdría la pena; los escépticos, entre ellos altos cargos del Gobierno de EE.UU., advierten de que los gastos adicionales serían prohibitivos. Pero ambas partes están equivocadas. Adecuadamente conducida, la protección climática *reduciría* los

costes, no los aumentaría. Un aprovechamiento más eficiente de la energía brindaría un filón económico, no ya por los beneficios que supondría detener el calentamiento global, sino también porque ahorrar combustibles fósiles es mucho más barato que comprarlos.

En el mundo abundan los métodos de eficacia comprobada para emplear la energía más productivamente. Diversas empresas los están ya aplicando. Durante la última década, la empresa DuPont ha incrementado su producción en casi un 30 por ciento; sin embargo, ha reducido el gasto energético en un 7 por ciento y las emisiones de gas de efecto invernadero en un 72 por ciento (medidas en función de su equivalente en dióxido de carbono), con un ahorro hasta ahora de más de dos mil millones de dólares. Otras cinco firmas importantes —IBM, Bri-

EN SÍNTESIS

El sector energético de la economía mundial es despilfarrador. Si mejorara la eficiencia energética en fábricas, edificios, vehículos y artículos domésticos, se reduciría el consumo de carbón y combustibles derivados del petróleo.

Para conseguirlo, el método más rápido y lucrativo consiste en mejorar el rendimiento en el uso final, como con productos de bajo consumo o mejoras en las construcciones de viviendas e industrias.

Con ello no solo se mitigarían los daños al clima terrestre, sino que también se ahorrarían inmensas cantidades de dinero en empresas y hogares.

LA QUEMA de combustibles
fósiles, amén de contribuir
al calentamiento global,
dilapida el dinero.



La encrucijada de la energía

EL PROBLEMA:

- El sector energético de la economía mundial es despilfarrador. En centrales eléctricas y edificios se derrocha calor en enormes cantidades; coches y camiones disipan la mayoría de la energía que les cede el combustible, y los electrodomésticos malgastan buena parte de la suya (y a menudo gastan electricidad aun estando apagados).
- Si no se hace nada, seguirá quemándose petróleo y carbón, y con ellos cientos y cientos de miles de millones de euros al año; los problemas relativos al clima, la contaminación y la seguridad empeorarán.

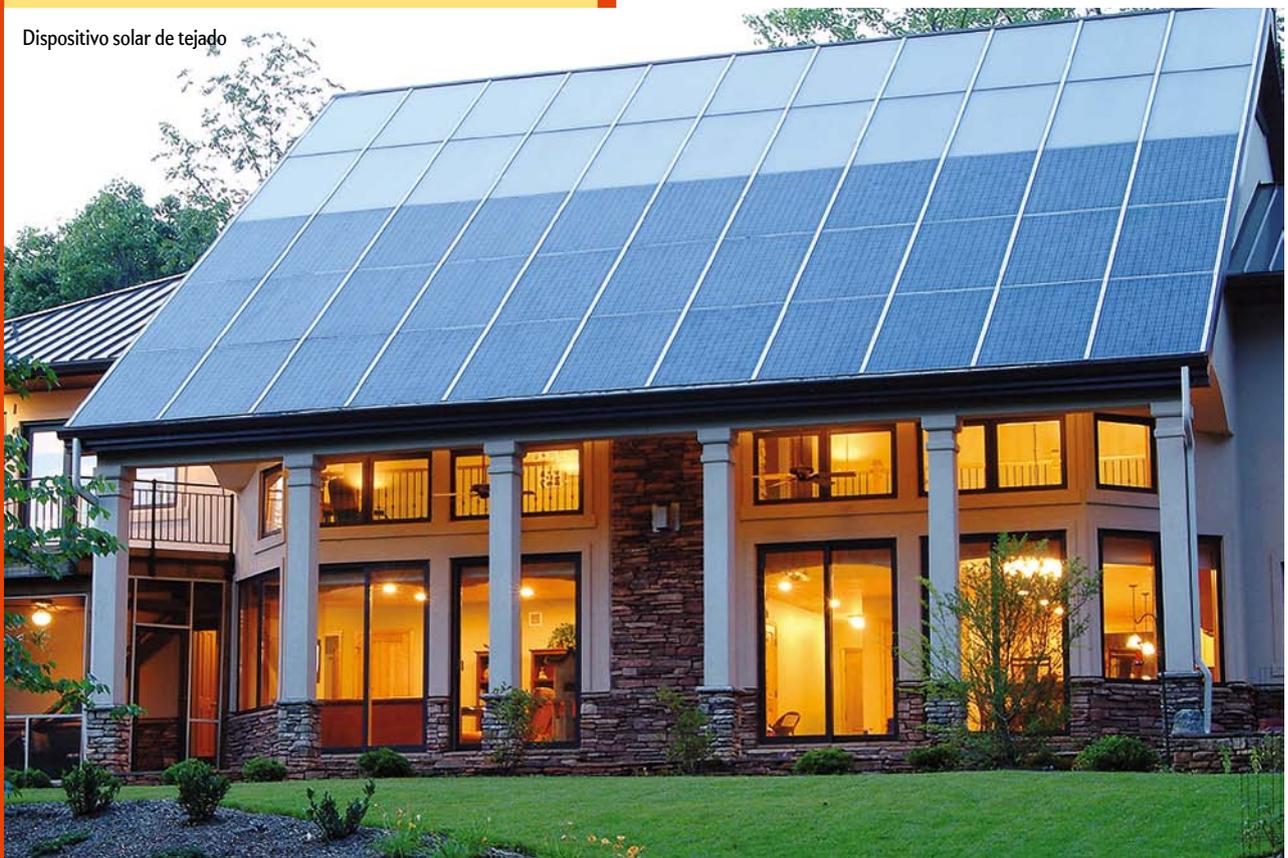
EL PLAN:

- Para ahorrar energía, el método más rápido y lucrativo es mejorar el rendimiento en el uso final. Numerosos productos de bajo consumo no cuestan más que los de alto consumo. Viviendas y fábricas que gasten menos energía pueden construirse a menor coste que las corrientes. Reducir la masa de los vehículos puede doblar su economía de combustible sin comprometer la seguridad ni elevar el precio de venta al público.
- Mediante la mejora de la eficiencia energética y las fuentes de energía renovable, para 2050 se podría llegar a eliminar el uso de los combustibles petrolíferos. Las empresas con afán de lucro pueden marcar el camino.

tish Telecom, Alcan, Norske Canada y Bayer— han ahorrado en conjunto otros dos mil millones de dólares desde comienzos de los años noventa y han reducido en más de un 60 por ciento sus emisiones de carbono. En 2001, la petroquímica BP cumplía el objetivo que se había impuesto de reducir sus emisiones de dióxido de carbono para 2010 a un diez por ciento menos que sus emisiones de 1990; en diez años redujo su factura energética en 650 millones de dólares. Y en mayo de 2005, General Electric se comprometió a elevar su eficiencia energética en un 30 por ciento para el año 2012; persigue así aumentar su valor accionario. Estas empresas, y decenas como ellas, saben que la eficiencia energética mejora la cuenta de resultados y rinde unos beneficios adicionales aún más valiosos: aumento de la calidad y fiabilidad en sus plantas, aumento del 6 al 16 por ciento en la productividad de la mano de obra en unas instalaciones más eficientes y aumento de las ventas de un 40 por ciento en unos locales comerciales diseñados para que los ilumine sobre todo la luz diurna.

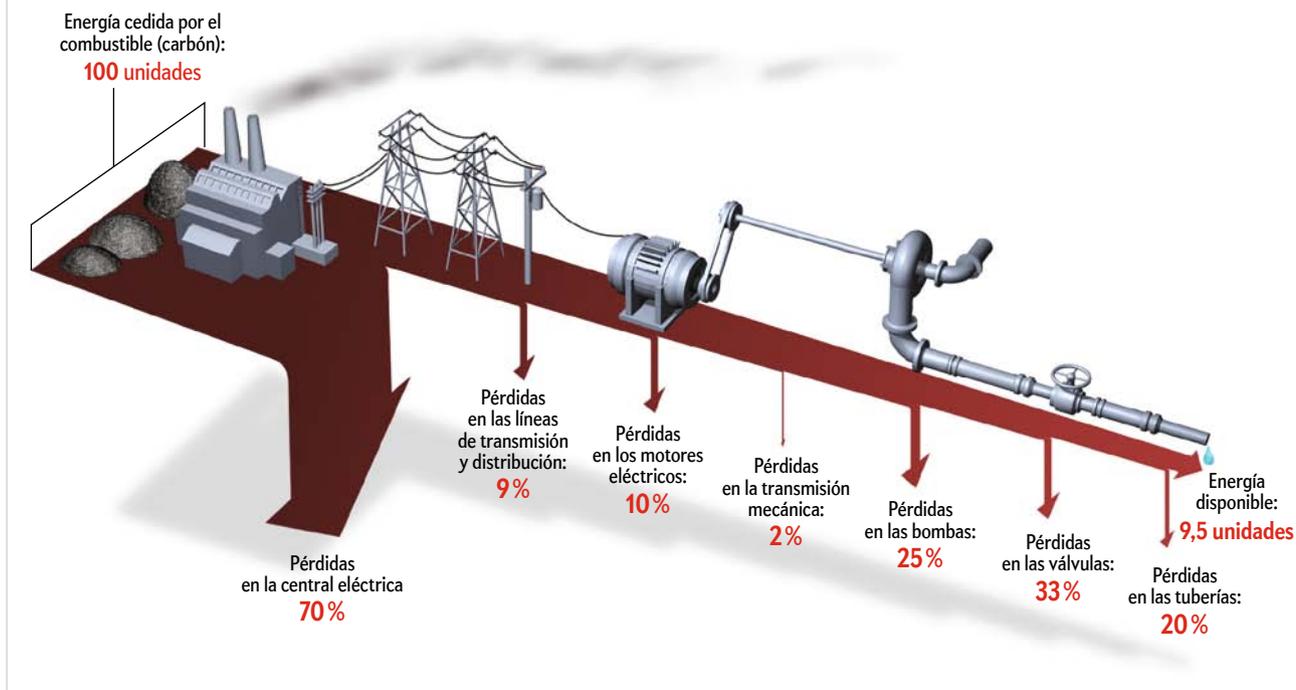
Actualmente, EE.UU. gasta un 47 por ciento menos de energía por dólar de producción que hace 30 años, lo que rebaja los costes en mil millones de dólares diarios. Tales ahorros actúan a modo de enorme reducción fiscal, que va asimismo recortando el déficit federal. Lejos de frenar el desarrollo global, unas facturas energéticas más bajas lo aceleran. Y hay muchas más economías posibles en cada etapa de la producción, distribución y consumo de la energía. Convertir en las centrales eléctricas el carbón en la energía que luego será luz en nuestras viviendas tiene un rendimiento de solo el 3 por ciento. La mayor parte del calor que se desperdicia, por ejemplo, en las centrales eléctricas estadounidenses —una energía superior en un 20 por ciento a la que gasta Japón en todos los usos—,

Dispositivo solar de tejado



Desglose de pérdidas

Las ineficiencias a lo largo del trayecto desde la central eléctrica hasta una conducción industrial merman la energía cedida por el combustible —arbitrariamente fijada en 100 unidades en este ejemplo— en más del 90 por ciento; solo quedan 9,5 unidades de energía para impulsar el fluido a la salida de la tubería. Pero un pequeño aumento en la eficiencia del uso final podría invertir el sentido de ese balance de pérdidas. Por ejemplo, ahorrar una unidad de energía de salida gracias a la reducción del rozamiento dentro de la tubería recorta en 10 unidades la energía que debe ceder el combustible, lo que rebaja drásticamente los costes y la contaminación en la central eléctrica, a la vez que permite el empleo de motores y bombas más pequeños y baratos.



podría reciclarse lucrativamente. En EE.UU., alrededor del 5 por ciento de la electricidad doméstica se pierde en dar energía a ordenadores, televisores y otros aparatos apagados. (La electricidad desperdiciada a causa de los circuitos de espera mal diseñados equivale a la producción de una docena de centrales de 1000 megavatios funcionando a toda su potencia.) En total, el despilfarro energético evitable cuesta, solo a los estadounidenses, centenares de miles de millones de dólares; en la economía mundial, el desperdicio es de alrededor de un billón de euros al año, perdidos en desestabilizar el clima sin ningún provecho.

Si la eficiencia energética posee tal potencial, ¿por qué no nos esforzamos en lograrla? Para empezar, muchos confunden la eficiencia (hacer más con menos) con las restricciones, las incomodidades o las privaciones. Otro obstáculo es que los consumidores desconocen cuán beneficioso les sería mejorar la eficiencia, ya que la energía se ahorra en millones de detalles, no mediante cambios a gran escala. La mayoría no puede prestar tiempo ni atención a informarse acerca de las modernas técnicas de mejora de la eficiencia, que evolucionan a un ritmo que ni los expertos pueden seguir. Además, las subvenciones a cargo de los contribuyentes han hecho que la energía parezca barata. Aunque la administración norteamericana ha declarado prioritaria la mejora de la eficiencia energética, ese compromiso es retórico. Normas y costumbres muy arraigadas bloquean los esfuerzos por mejorar los rendimientos, si no premian el

despilfarro. Sin embargo, ciertos cambios no demasiado complejos convertirían esos obstáculos en oportunidades de hacer negocio.

La mejora de la eficiencia es una medida vital para conseguir un sistema energético que no resulte perjudicial para el clima, pero a la adopción de combustibles que emitan menos carbono también le toca un papel importante. La economía mundial ya está prescindiendo del carbono: en los dos últimos siglos, los combustibles ricos en carbono, como el carbón, han cedido el paso a combustibles con menos carbono (petróleo y gas natural) o carentes del mismo (fuentes renovables, como la energía solar o la eólica). Hoy, menos de un tercio de los átomos de combustible fósil quemados son de carbono; el resto son de hidrógeno, inocuo para el clima. Esa tendencia a la descarbonización está reforzada por unos mayores rendimientos en la conversión, distribución y empleo de la energía; por ejemplo, combinando la producción de calor y electricidad puede extraerse el doble de trabajo útil de cada tonelada de carbono emitida a la atmósfera. Juntos, esos avances podrían reducir radicalmente las emisiones totales de carbono hacia 2050, aunque a la vez crezca la economía mundial. Este artículo se centra en el premio mayor: exprimir más trabajo de cada unidad de energía entregada a las empresas y a los consumidores. En cada etapa del trayecto desde los lugares de producción hasta los puntos de servicio se pierden grandes cantidades de energía. Pequeñas reducciones en la potencia empleada donde

desemboca la cadena pueden rebajar enormemente la potencia útil requerida donde arranca.

LA REVOLUCIÓN DEL BAJO CONSUMO

Numerosos productos de bajo consumo energético, antes costosos y raros, son ahora económicos y comunes. Así, los controles de velocidad electrónicos se producen en masa y tan baratos, que algunos proveedores los incluyen como extra gratuito en sus motores. El precio de las bombillas fluorescentes de bajo consumo ha bajado mucho en los últimos años. Gastan entre 75 y 80 por ciento menos electricidad que las bombillas de incandescencia y duran de 10 a 13 veces más. Los revestimientos de ventana que transmiten la luz y reflejan el calor cuestan un cuarto de lo que costaban hace cinco años. En el caso de algunos equipos de mercados muy competitivos —motores eléctricos, bombas industriales, televisores o frigoríficos—, algunos modelos de muy bajo consumo no cuestan más que los otros. Sin embargo, la revolución oculta de su combinación y aplicación reviste una importancia mucho mayor que todas estas técnicas mejores y más baratas.

¿Cuánto aislante térmico es adecuado para una casa en un clima frío? La mayoría de los ingenieros dejarían de añadir aislante cuando el gasto en más material se hiciera mayor que los ahorros a lo largo del tiempo en las facturas de calefacción. Pero esa comparación omite los gastos de instalación del sistema de calefacción —la caldera, tuberías, bombas, ventiladores, etcétera—, del que podría prescindirse con un aislamiento lo bastante bueno. Consideremos mi propia casa, construida en 1984 en Snowmass (Colorado), donde las temperaturas invernales pueden bajar hasta -44 grados Celsius y las heladas se dan en cualquier momento del año. La casa carece de sistema de calefacción clásico; en cambio, el tejado está aislado con 20 a 30 centímetros de espuma de poliuretano, y sus muros de ladrillo de 40 centímetros de espesor emparedan otros 10 centímetros de ese mismo material. En las ventanas de doble hoja se combinan dos o tres capas finas termorreflectoras transparentes con gas criptón aislante: bloquean el calor igual que una pila de ocho a catorce hojas de vidrio. Esas características, junto con el calor recuperado del aire ventilado, reduce las pérdidas térmicas de la casa a alrededor de solo un 1 por ciento más que el calor tomado de la luz solar, los electrodomésticos y las personas del interior. Esa minúscula pérdida puedo compensarla jugando con mi perra (que genera unos 50 vatios de calor, ajustables hasta los 100 vatios si se le arroja una pelota) o, en las noches más frías, quemando estudios energéticos obsoletos en una pequeña estufa de leña.

Eliminando el sistema de calefacción reduje los costes de construcción en 1100 dólares (de 1983). Luego reinvertí ese dinero, más otros 4800 dólares, en instalaciones que ahorran la mitad del agua, el 99 por ciento de la energía para calentar agua y el 90 por ciento de la electricidad doméstica. La estructura, de 370 metros cuadrados —que alberga también la sede original del Instituto de las Montañas Rocosas (RMI), asociación sin ánimo de lucro que cofundé en 1982—, consume apenas más electricidad que una sola bombilla de 100 vatios. (Esta cifra excluye la potencia consumida por el equipo de oficina del instituto.) Unas células solares generan de cinco a seis

veces esa electricidad; revendo el excedente a la compañía eléctrica. En conjunto, todas las inversiones en eficiencia energética se amortizaron en 10 meses con las técnicas de 1983; las de hoy son mejores y más baratas.

En el decenio de 1990, Pacific Gas & Electric acometió un experimento, lo llamaron ACT², que aplicó el diseño inteligente a siete edificios nuevos y viejos con la intención de demostrar que las mejoras de eficiencia energética grandes resultan más económicas que las pequeñas. Por ejemplo, construyeron a las afueras de Davis (California) una casa que se conservaba fresca durante el verano sin acondicionamiento de aire. Estimaron que construir ese tipo de vivienda costaría, si se difundiese lo suficiente, unos 1800 dólares menos que edificar una casa corriente del mismo tamaño, y a lo largo de su vida útil habría que gastar 1600 dólares menos en su mantenimiento.

Análogamente, el arquitecto tailandés Soontorn Boonyatikarn construyó en 1996, en las cercanías del húmedo y caluroso Bangkok, una casa que requería solo un séptimo de la capacidad de acondicionamiento de aire que se instala en una estructura de esas dimensiones; el ahorro en equipamiento pagó el techo, los muros y las ventanas aislantes que mantienen fresca la casa. En todos estos casos, el enfoque del diseño fue el mismo: optimizar el edificio en su totalidad para obtener múltiples beneficios en vez de buscar un beneficio componente a componente, considerados por separado.

Esta ingeniería de sistemas completos puede también aplicarse a edificios de oficinas y plantas industriales. En 1997, los proyectistas de una fábrica de alfombras de Shangái redujeron en un 92 por ciento, merced a dos sencillos cambios, la potencia de bombeo necesaria en un circuito de circulación de calor. El primer cambio consistió en instalar tuberías más anchas, con lo que redujeron notablemente el rozamiento y el sistema pudo emplear bombas y motores más pequeños. La segunda innovación fue trazar el recorrido de las tuberías antes de situar las máquinas que debían conectar. Como resultado, el fluido se movía por tramos cortos y rectos, sin tortuosidades, reduciendo aún más el rozamiento y los gastos de instalación.

Esto no es astronáutica; se trata solo de redescubrir la buena ingeniería victoriana. Y es de aplicación general. Un equipo de ensayos del Instituto de las Montañas Rocosas ha creado recientemente diseños de nuevas construcciones que brindan

ahorros energéticos del 89 por ciento a los centros informáticos, del orden del 75 por ciento a las plantas químicas, del 70 al 90 por ciento a los supermercados y aproximadamente del 50 por ciento a los yates de lujo, todos con unos gastos de capital instalado inferiores a los de los diseños ordinarios. El equipo ha propuesto también actualizaciones de refinerías de petróleo, minas y fábricas de microcircuitos ya existentes que reducirían del 40 al 60 por ciento el consumo energético, con un gasto amortizable en pocos años.

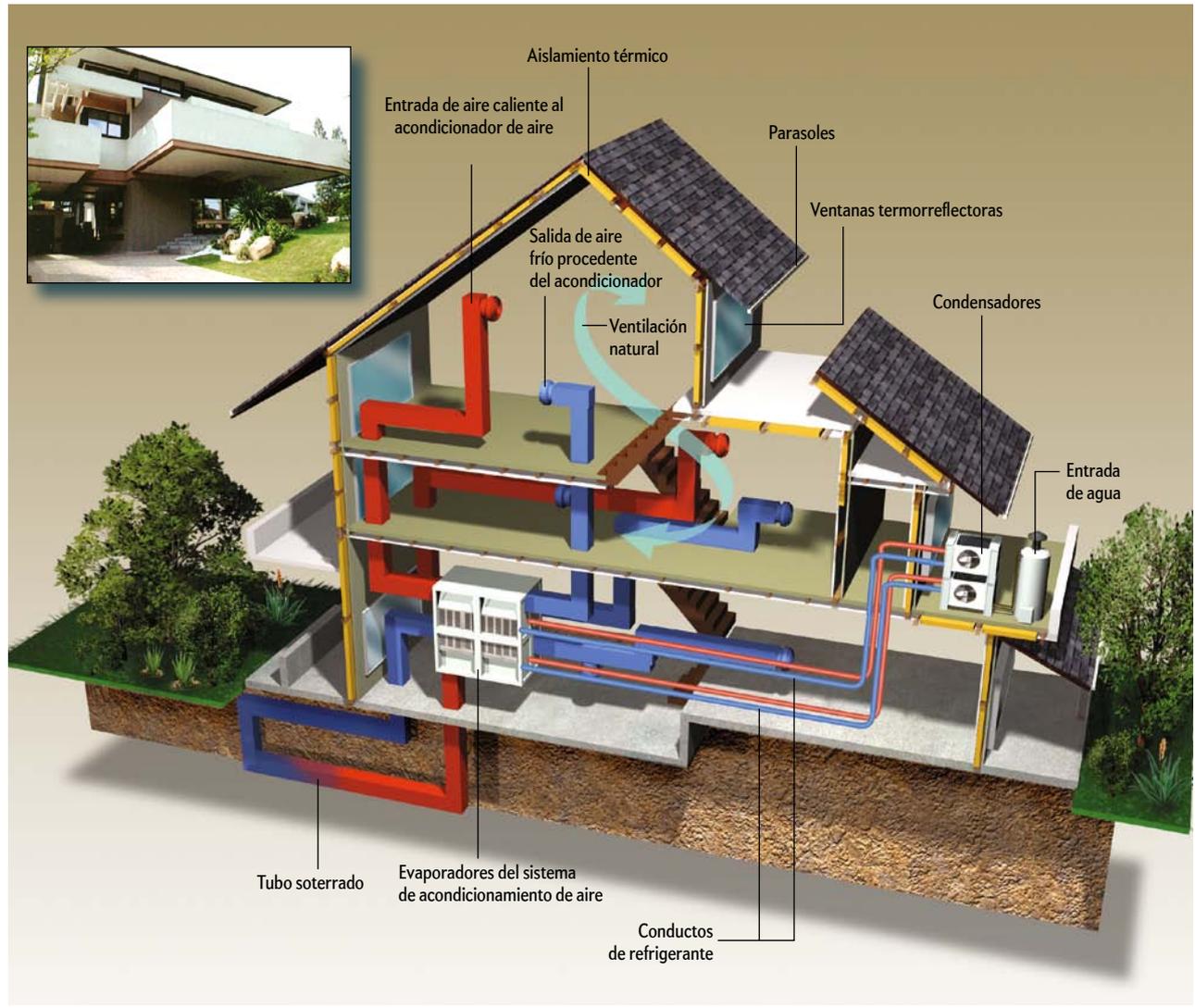
VEHÍCULOS MENOS DERROCHADORES

En EE.UU., el transporte consume el 70 por ciento del petróleo producido y genera un tercio de las emisiones carbónicas del país. Se da por generalmente admitido que constituye la parte más espinosa del problema climático, especialmente porque en China e India hay cen-

Si se adoptara el principio de la eficiencia energética en vehículos, edificios e industrias, el gasto de petróleo previsto para 2025 podría reducirse a la mitad

Hogares frescos en zonas cálidas

¿Cómo se consigue un ambiente fresco en la tropical Tailandia a la vez que se minimiza el gasto energético? El arquitecto Soontorn Boonyatikarn, de la Universidad de Chulalongkorn, empleó aleros y terrazas para proteger del sol su casa de 350 metros cuadrados en Pathumthani, cerca de Bangkok. El aislamiento, una estructura hermética y unas ventanas reflectoras de infrarrojos impiden la entrada al calor mientras dejan pasar una buena cantidad de luz solar. Que el interior carezca de tabiques y un hueco de escalera central favorecen la ventilación; el aire interior se enfría al fluir por un tubo enterrado. Como resultado, la casa necesita solo un séptimo de la capacidad de acondicionamiento de aire que suele instalarse en una estructura de estas dimensiones. Para reducir aún más la factura energética, los condensadores del sistema de acondicionamiento de aire calientan el agua de la casa.



tenares de millones de compradores de automóviles. Pero el transporte ofrece enormes oportunidades a la eficiencia energética. En *Winning the Oil Endgame (Ganar el órdago del petróleo)*, un estudio redactado en 2004 por mi equipo del Instituto de las Montañas Rocosas, se descubre que combinando ingeniosamente materiales ligeros con innovaciones en la propulsión y aerodinámica podría reducirse en dos tercios el consumo de combustible de coches, camiones y aviones sin comprometer la comodidad, la seguridad, las prestaciones ni los precios.

Pese a 119 años de perfeccionamientos, el rendimiento total de los vehículos modernos sigue siendo asombrosamente bajo. A las ruedas todavía llega solo el 13 por ciento de la energía del

combustible; el otro 87 por ciento se disipa como calor y ruido en el motor y la transmisión, o se pierde en ralentís y accesorios, en los acondicionadores de aire por ejemplo. De la energía entregada a las ruedas, más de la mitad sirve para calentar los neumáticos, la calzada y el aire. Solo el 6 por ciento de la energía del combustible acelera el vehículo (y esa energía se emplea en calentar los frenos cuando paramos). Y como el 95 por ciento de la masa acelerada es del mismo vehículo, solo menos del 1 por ciento del combustible acaba propulsando al conductor.

Sin embargo, la física nos da la solución obvia: reducir en lo posible el peso del automóvil, causante de tres cuartos de las pérdidas en las ruedas. Por cada unidad de energía ahorrada en

las ruedas al disminuir el peso (o reducir la resistencia del aire), se ahorrarán siete unidades adicionales de la energía que ahora se pierde. El interés por reducir costes y aumentar la seguridad desalienta los intentos de construir autos más livianos, pero los materiales modernos —las nuevas aleaciones metálicas y los materiales compuestos poliméricos avanzados (fibras inmersas en matrices de resina)—, ligeros aunque fuertes, pueden rebajar drásticamente la masa de un vehículo sin sacrificar su seguridad estructural en los choques. Por ejemplo, los materiales compuestos de fibra de carbono absorben de seis a doce veces más energía de impacto por kilogramo que el acero, lo que compensa con creces la desventaja en masa del auto si choca con otro de acero de masa doble. Con estos materiales nuevos, los coches pueden ser grandes, cómodos y seguros sin resultar pesados, ineficientes y hostiles, ahorrando petróleo y vidas a la vez. Como dijo Henry Ford, más peso no significa más resistencia. Si se diera tal equivalencia, los cascos de los ciclistas serían de acero y no de fibra de carbono.

Las técnicas de manufactura avanzadas desarrolladas durante los dos últimos años podrían conseguir que las carrocerías hechas de materiales compuestos de carbono fueran competitivas frente a las de acero. Una carrocería más ligera permitiría a los fabricantes de automóviles emplear motores más pequeños (y menos caros). Y como el ensamblado de coches de materiales compuestos de carbono no requiere talleres de carrozado ni de pintura, las fábricas serían más pequeñas; construir las costaría un 40 por ciento menos que edificar una planta corriente. Esos ahorros compensarían el mayor precio de los materiales compuestos de carbono. En total, con las carrocerías ultraligeras podría conseguirse que el rendimiento del combustible viniera a doblar el de los modernos coches eléctricos híbridos —donde ese rendimiento ya es el doble que en los coches comunes— sin elevar el precio de venta al público. Si los materiales compuestos no estuvieran a punto, podríamos echar mano de los nuevos aceros ultraligeros. La competencia en el mercado dirá cuál es el material ganador. En cualquier caso, antes de diez años los vehículos ultraligeros de muy bajo consumo empezarán a destacarse del grueso del pelotón.

Más aún, los coches ultraligeros podrían acelerar mucho la transición hacia los automóviles impulsados por pilas de combustible. Un monovolumen de tamaño medio, cuyo peso y resistencia del aire se hubieran reducido a la mitad, con lo que la potencia requerida en sus ruedas se habría reducido en dos tercios, consumiría unos dos litros por cien kilómetros, con lo que necesitaría solo una pila de combustible de 35 kilovatios, un tercio del tamaño corriente y, por tanto, más fácil de fabricar asequiblemente. Y como el vehículo solo necesitaría acarrear la tercera parte de hidrógeno, no requeriría una nueva técnica de almacenamiento; unos depósitos de fibra de carbono pequeños, nada peligrosos y de serie podrían contener hidrógeno suficiente para propulsar el vehículo durante 530 kilómetros. Así pues, el primer fabricante de automóviles que se pase a los ultraligeros ganará la carrera de las pilas de combustible. Hay,

pues, un poderoso incentivo para que los fabricantes innoven con valentía en lo que se refiere a materiales y fabricación, a la manera de lo que acometen ahora unos pocos en lo concerniente a la propulsión.

El análisis del Instituto de las Montañas Rocosas muestra que, de adoptarse el principio de la eficiencia energética en vehículos, edificios e industrias, el gasto de petróleo previsto para 2025 en EE.UU. —28 millones de barriles diarios— podría disminuir a menos de la mitad; el consumo se rebajaría a niveles no conocidos desde 1970. Siendo realistas, para 2025 solo se podrá lograr la mitad de esas economías, pues aún estarían en servicio muchos coches y camiones antiguos y de mayor consumo (el parque de automóviles cambia muy despacio). Pero podría llegarse a prescindir de los combustibles derivados del petróleo antes de 2050 duplicando primero la eficiencia de su empleo y sustituyéndolo luego por otras fuentes de energía. Las empresas podrían sacar grandes beneficios gracias a ese cambio, pues ahorrar un barril de petróleo merced a la mejora del rendimiento cuesta solo 12 dólares, menos de un quinto del actual precio de venta del crudo. Y hay dos clases de fuentes de energías alternativas que podrían competir con el petróleo aunque este se vendiera a menos de la mitad de su precio actual.

La primera es el etanol, obtenible de plantas leñosas o herbáceas, como el álamo o la gramínea *Panicum virgatum*. Actualmente, en EE.UU. el maíz es la primera fuente de etanol, que se mezcla con gasolina, pero las plantas leñosas producen el doble de etanol por tonelada que el maíz y con menos inversiones de capital y mucho menos consumo energético.

La segunda opción alternativa consiste en remplazar el petróleo por gas natural con menor contenido en carbono, que se abarataría y abundaría más, a medida que el aumento en eficiencia redujera la demanda de electricidad en las horas de máxima carga. En esas horas, las turbinas de gas trabajan con tal derroche que, economizando el 1 por ciento de la electricidad, se reduciría en un 2 por ciento el consumo estadounidense de gas natural y su precio en un 3 o 4 por ciento. El gas ahorrado así y en otros usos podría sustituir al petróleo directamente o bien convertirlo en hidrógeno, lo que reportaría un provecho y eficiencia mayores.

Los beneficios de eliminar poco a poco los combustibles fósiles irían mucho más allá del ahorro estimado en 70.000 millones de dólares al año. La transición rebajaría en un 26 por ciento las emisiones carbónicas de EE.UU. y eliminaría todos los costes sociales y políticos de la obtención y consumo de crudos: conflictos militares, inestabilidad de los precios, complicaciones fiscales y diplomáticas, contaminación, etcétera. Si el país se liberara de su dependencia del petróleo, ya no le valdría la pena combatir por él. Además, el Pentágono cosecharía inmediatamente los frutos de favorecer la eficiencia energética, pues necesita desesperadamente reducir los costes y riesgos de abastecer de combustible a sus tropas. Al igual que los esfuerzos en investigación del Departamento de Defensa de EE.UU. transformaron la industria civil al crear Internet y el

Adicción al petróleo

28 millones

de barriles de petróleo se consumirán a diario en EE.UU. en 2025, si prosigue la tendencia actual

13 por ciento

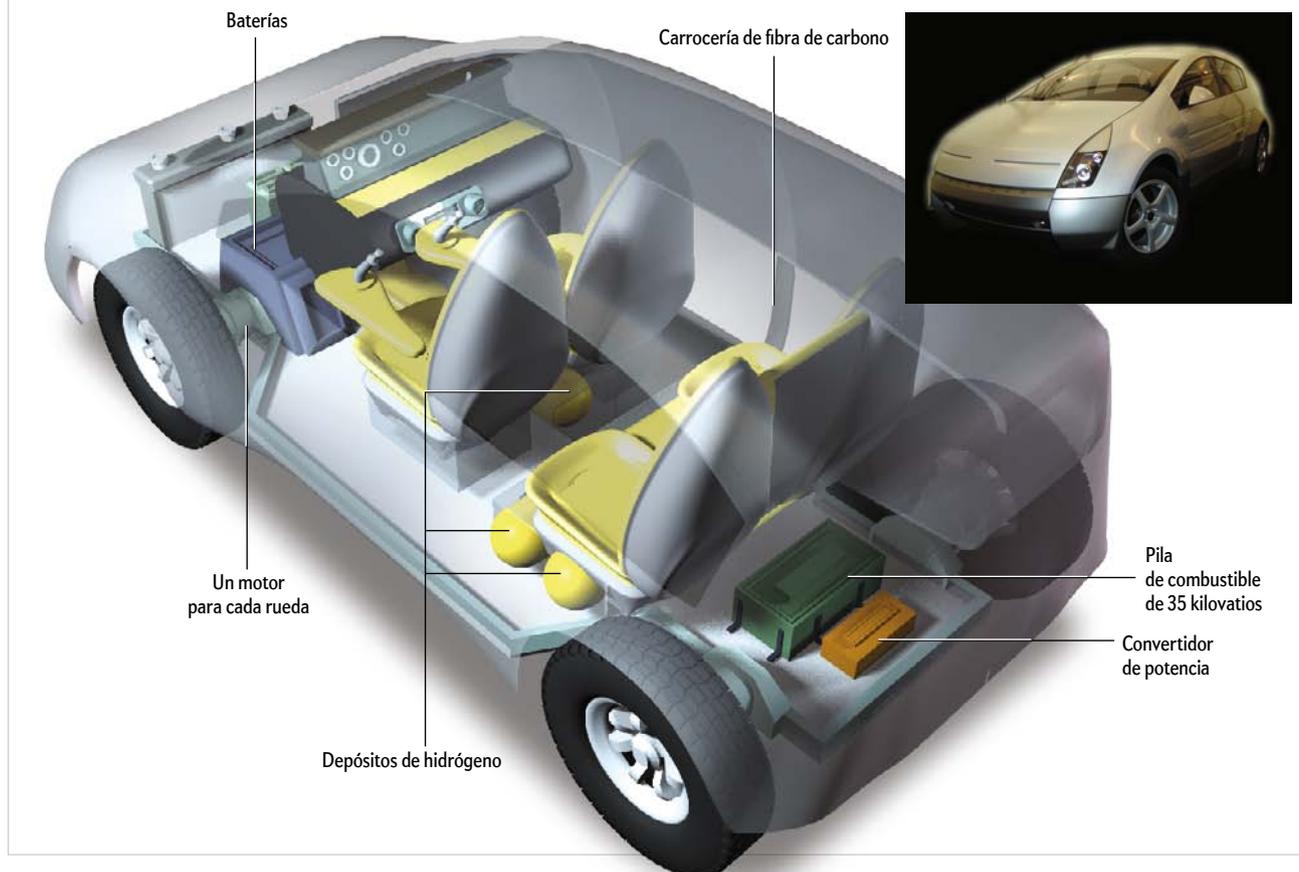
Proporción de la energía cedida por el combustible que llega a las ruedas de un automóvil

70.000 millones de dólares

Ahorro anual (en 2025) posible mejorando la eficiencia energética en el uso de los combustibles petrolíferos y hallando sustitutos para estos

Coches ultraligeros

Los coches ultraligeros pueden ser rápidos, espaciosos, seguros y eficientes. *Revolution*, un prototipo de monovolumen diseñado en 2000, de tamaño medio y cinco asientos, pesa solo 857 kilogramos —menos de la mitad que un coche convencional comparable—, pero su habitáculo seguro de fibra de carbono protegería a los pasajeros en colisiones a gran velocidad con vehículos mucho más pesados. Una pila de combustible de 35 kilovatios lo propulsaría durante 530 kilómetros con los 3,5 kilogramos de hidrógeno de sus depósitos. Podría acelerar hasta los 100 kilómetros por hora en 8,3 segundos.



GPS, ahora deberían conducir el desarrollo de los materiales ultraligeros avanzados.

El paso a una economía no dependiente del petróleo sería aún más rápido que lo previsto por el Instituto de las Montañas Rocosas si los responsables políticos cesaran de fomentar unas pautas que obligan a usar tanto los automóviles. No debería ordenarse o subvencionarse la dispersión de urbanizaciones alrededor de las ciudades. Concentrar la población ahorra combustible de manera menos perturbadora que otros métodos de limitar el tráfico motorizado (como las draconianas tasas sobre combustibles y coches con que Singapur evita atascos de la magnitud de los de Bangkok).

ENERGÍAS RENOVABLES

Asimismo, unas mejoras en la eficiencia energética que nos ahorrasen la mayoría de nuestro consumo eléctrico actual serían más baratas que el carbón que hoy queman las compañías eléctricas para generar la mitad de la energía eléctrica consumida en EE.UU. y el 37 por ciento de la española, y emitir el 38 por ciento de las emisiones de carbono procedentes de combustibles fósiles (en EE.UU.). Han progresado mucho en los últimos años las opciones alternativas a las centrales de carbón: las fuen-

tes no perecederas —en especial los generadores solares y eólicos— y las plantas descentralizadas de cogeneración que producen a la vez electricidad y calor en edificios y fábricas. A escala mundial, la capacidad de generación conjunta de esas fuentes es ya mayor que la de las centrales nucleares y crece seis veces más deprisa. Esa tendencia impresiona tanto más cuanto que los generadores descentralizados se enfrentan a muchos obstáculos que traban la justa competencia y a unas subvenciones muy inferiores a las que reciben las plantas centralizadas de carbón y nucleares.

Acaso, el mayor éxito corresponda a la energía eólica. La producción masiva y una ingeniería perfeccionada han conseguido que los modernos generadores eólicos sean grandes (con capacidades unitarias de dos a cinco megavatios), altamente fiables y muy benignos con el entorno. Dinamarca ya extrae del viento un quinto de su electricidad, Alemania un décimo y España más del 6 por ciento. Alemania y España están añadiendo 2000 megavatios de potencia eólica cada año; Europa aspira a obtener el 22 por ciento de su electricidad y el 12 por ciento de su energía total de fuentes no perecederas en 2012. En contraste, la capacidad mundial de las centrales nucleares se espera que siga estancada, para luego decaer.



Generadores eólicos en Alemania

La crítica más común a la energía eólica —su intermitencia— no ha resultado un inconveniente grave. En zonas de Europa que obtienen toda la energía generada por el viento solo en algunos días, las compañías eléctricas han resuelto el problema diversificando la ubicación de las turbinas, tomando en cuenta las previsiones sobre el viento en los planes de generación e integrando la potencia eólica con la hidroeléctrica y la procedente de otras fuentes. La generación eólica y la solar trabajan juntas especialmente bien, en parte porque las condiciones adversas para la eólica (tiempo calmado y soleado) son buenas para la solar, y viceversa. Bien combinadas, las instalaciones eólicas y las solares son más fiables que las centrales eléctricas ordinarias; constan de módulos más pequeños (turbinas eólicas, células

solares, aunque actualmente más caras por kilovatio hora que las turbinas eólicas, serían rentables integradas en edificios, porque ahorran materiales de techado. En los grandes edificios comerciales de techo plano, las células solares pueden competir sin subvenciones si se las combina con un uso eficiente que permita al propietario del edificio revender la energía sobrante cuando más abundante y valiosa es, en las tardes soleadas [la tarifa de venta de la energía fotovoltaica en España es, según el Real Decreto 436/2004, un 300 por ciento de la tarifa media de referencia, o un 575 por ciento si la potencia instalada no supera los 100 kW]. La generación solar suele ser también la mejor solución para dotar de electricidad a los dos millones de personas que carecen de acceso a líneas de trans-

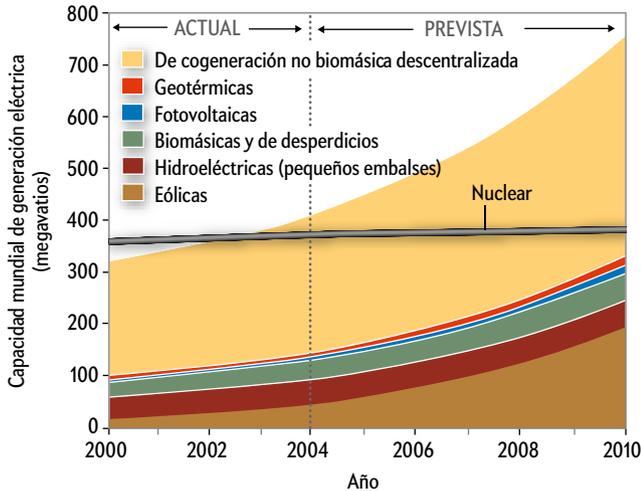
las solares) que difícilmente fallarán a la vez, su coste no se descontrola cuando sube el precio de los combustibles fósiles y no es probable que sufran atentados.

La energía renovable ya resulta ventajosa económicamente. En 2003, la energía eólica se vendía en EE.UU. por solo 2,9 centavos de dólar el kilovatio hora. La generación eólica está subvencionada por el Gobierno federal mediante una desgravación fiscal, pero aun sin esta, el precio —unos 4,6 centavos por kilovatio hora— sigue siendo menor que el de la energía subvencionada de las nuevas centrales de carbón o nucleares. La subvención a la energía eólica es de carácter temporal y el Congreso la ha dejado expirar repetidamente; en cambio, los subsidios a las industrias nucleares y de combustibles fósiles son más cuantiosos y estables.

[En España, la cesión de energía eólica a una empresa distribuidora está regulada por el Real Decreto 436/2004. La tarifa es de un 90 por ciento de la llamada tarifa media de referencia, que es de unos 7 céntimos de euro el kilovatio hora. Puede venderse también libremente en el mercado, en cuyo caso se suman al precio de mercado una prima del 40 por ciento de la tarifa media y un incentivo del 10 por ciento.]

La energía eólica es además abundante: unos parques eólicos que ocuparan, por ejemplo, una reducida fracción de la tierra disponible en ambas Dakotas cubriría rentablemente todas las necesidades de electricidad de Estados Unidos. Las

FUENTES ALTERNATIVAS



misión. Pero incluso en los países ricos, una casa tan eficiente como la mía puede conseguir toda su electricidad con solo unos pocos metros cuadrados de células solares, cuya instalación es más barata que con conectarse a las líneas de distribución cercanas.

UNA SOLUCIÓN MÁS BARATA

Una política orientada a perfeccionar sin grandes gastos la eficiencia energética y unas fuentes competitivas de energías no perecedoras pueden invertir la terrible aritmética del cambio climático, que se acelera exponencialmente a consecuencia del consumo creciente de combustibles fósiles. La eficiencia energética puede mejorar más deprisa que la economía crece: entre 1977 y 1985, por ejemplo, el producto interior bruto (PIB) norteamericano creció un 27 por ciento, mientras que el consumo de petróleo disminuyó un 17 por ciento. (En el mismo período, las importaciones de petróleo cayeron un 50 por ciento, y las importaciones del golfo Pérsico se desplomaron un 87 por ciento.) El crecimiento de las energías no perecedoras ha rebasado al PIB; a escala mundial, las producciones de energías solar y eólica se duplican cada dos y tres años, respectivamente. Si tanto la eficiencia como la generación de energías renovables crecen más rápido que la economía, las emisiones de carbono disminuirán y el calentamiento global se retardará, concediéndonos más tiempo para desarrollar técnicas aún mejores que replacen el combustible fósil que aún quede en uso, o para dominar y poner en práctica procedimientos que retengan el carbono de combustión antes de que penetre en la atmósfera.

En contraste, la energía nuclear es una solución más lenta y mucho más cara. La entrega de un kilovatio hora de una central nuclear nueva cuesta al menos el triple que ahorrarlo aumentando la eficiencia. Así pues, cada dólar gastado en mejorar el rendimiento ahorraría el uso de al menos tres veces más carbón que si ese dólar se invirtiera en energía nuclear; además, esas mejoras de la eficiencia entrarían en efecto mucho más rápidamente porque construir reactores lleva tiempo. Desviar inversiones públicas y privadas de los ganado-

LAS FUENTES DESCENTRALIZADAS de electricidad —la cogeneración (generación combinada de electricidad y calor, habitualmente a partir de gas natural) y las no perecedoras (como las solares y las eólicas)— superaron mundialmente a las nucleares en capacidad de generación en 2002. La producción de este año de esas fuentes, con poco o ningún carbono, rebasará la de las centrales nucleares.

res en el mercado a los perdedores no solo distorsiona los mercados y reparte mal el capital financiero, sino que agrava el problema climático al apoyar una solución menos eficaz.

La buena nueva acerca del calentamiento global es que es más barato solucionarlo que ignorarlo. Como el ahorro de energía es lucrativo, el uso eficiente está ganando atractivo en los mercados. Skip Laitner, de la Agencia para la Protección Ambiental de EE.UU., calcula que desde 1996 a mediados de 2005 unas prudentes decisiones de empresas y consumidores, combinadas con una economía cada vez más cimentada en la información y los servicios, recortó en un 2,1 por ciento anual el gasto medio en energía por dólar de PIB, un ritmo de reducción casi triple que en los diez años anteriores. Ese cambio absorbió casi el 78 por ciento del aumento de la demanda energética en los últimos diez años (el resto se afrontó con el aumento del abastecimiento energético), y EE.UU. logró ese progreso sin ayuda de ningún avance técnico ni de nuevas políticas nacionales. El problema climático se debe a millones de malas decisiones tomadas durante decenios, pero la estabilidad climática puede recuperarse mediante millones de decisiones sensatas, comprando lámparas y coches más eficientes, revocando las subvenciones al despilfarro y recompensando los resultados deseables (por ejemplo, pagando a arquitectos e ingenieros por los ahorros y no por los gastos).

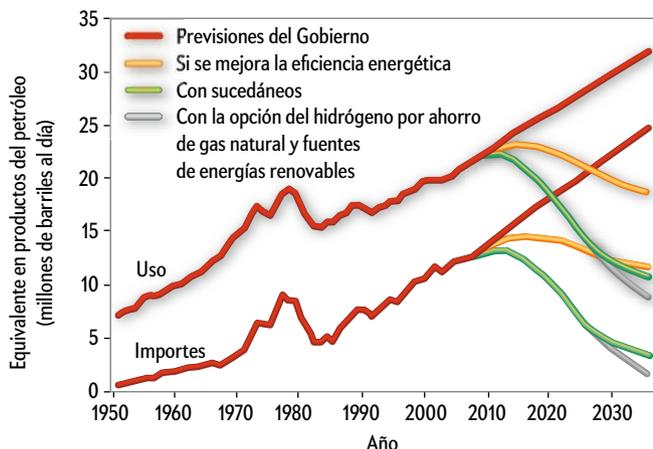
El papel correcto de un Gobierno es pilotar, no remar, pero durante años los responsables han estado llevando por un rumbo erróneo la nave de la energía. La actual política energética estadounidense perjudica al clima y la economía al rechazar los principios del mercado libre y someter las nuevas técnicas al favoritismo. Lo mejor es permitir que todos los métodos de producir o ahorrar energía compitan limpiamente, a los precios más justos, con independencia del tipo de inversión que sea, qué técnica se aplique, a qué escala y quién sea el propietario.

Así, pocas jurisdicciones admiten hoy que las fuentes de energía descentralizadas, como los dispositivos solares de tejado, se conecten directamente a la red eléctrica nacional, pese a que los estándares técnicos modernos permiten que se haga sin riesgo. Aunque 31 estados norteamericanos admiten que la compañía eléctrica compre al productor individual la electricidad que ha generado de sobra al mismo precio que se la vende, la mayoría restringen o distorsionan arbitrariamente esa competencia.

Pero el mayor de los obstáculos a la eficiencia en la producción de electricidad o gas es que se suele premiar a las compañías distribuidoras por vender más energía y penalizarlas por recortar las facturas a sus clientes. Por suerte, ese problema tiene fácil solución: los organismos reguladores deberían desligar in-

El ahorro de energía es lucrativo; el consumo eficiente está ganando atractivo en los mercados

ESTADOS UNIDOS LIBRE DE PETRÓLEO



centivos y ventas, y permitir luego a las distribuidoras que se queden con parte de los ahorros derivados de la reducción de la factura energética.

Han tardado en salir de Detroit vehículos de muy bajo consumo; ni los balances contables ni los directivos han apoyado las innovaciones más atrevidas. Además, EE.UU. grava poco la gasolina pero subvenciona mucho su producción, con lo que resulta, o resultaba hasta hace muy poco, más barata que el agua embotellada. Sin embargo, aumentar los impuestos sobre los combustibles podría no ser la mejor solución; en Europa, unos impuestos exorbitantes —que en muchos países elevan los precios de la gasolina a un euro o más el litro— contribuyen a reducir el uso de los coches más que a lograr que los nuevos modelos sean eficientes, pues los costes del combustible se diluyen en los demás gastos del dueño del coche y se descuentan muy rápidamente (la mayoría de los compradores solo contabiliza el ahorro en combustible correspondiente a los dos o tres primeros años). En Estados Unidos, las normas federales adoptadas en 1970 contribuyeron a mejorar el consumo de los automóviles y camionetas nuevos desde los 15 litros por cien kilómetros, en 1978, a los 10,7 litros por cien kilómetros en 1987, pero la media ha ido situándose en 11,7 l/100 km desde entonces. El Gobierno prevé que la industria automovilística pasará los próximos 20 años tratando de que sus vehículos sean más eficientes que en 1987 solo en 0,2 km por litro. Además, los fabricantes aborrecen las normas porque limitan la libertad de elegir y ya han aprendido a burlar al sistema vendiendo más vehículos clasificados como camionetas, en las que se consiente mayor consumo que en los coches. (Las camionetas de más consumo incluso reciben subvenciones especiales.)

La contramedida política más eficaz sería la «cuota de reembolso», que se cargaría a los coches nuevos ineficientes y se reembolsaría a los compradores de modelos eficientes. Aplicada por separado para cada categoría de vehículo, y evitar un sesgo contra los modelos de mayor tamaño, las cuotas de reembolso no restringirían la posibilidad de elegir de los compradores: la ampliarían. Tal política podría acelerar la adopción de coches, camiones y aviones de tecnología avanzada sin mandatos, impuestos, subvenciones ni leyes nacionales.

En Europa y Japón el obstáculo principal para el ahorro energético se esconde en la falsa creencia de que sus economías ya han alcanzado la máxima eficiencia energética posible. Cierto es que doblan el grado conseguido por EE.UU., pero les queda

EL CONSUMO Y LAS IMPORTACIONES de petróleo de EE.UU. pueden reducirse drásticamente de modo rentable doblando la eficiencia energética de vehículos, edificios e industrias (línea roja en el gráfico). EE.UU. puede lograr aún más reducciones sustituyendo los combustibles fósiles por sucedáneos competitivos, como los biocombustibles avanzados y el gas natural (líneas verdes), o el hidrógeno (líneas grises).

mucho camino por recorrer. Con todo, las mejores oportunidades se dan en los países en desarrollo, cuya eficiencia media es tres veces menor que la de EE.UU. En esos países se venden libremente, y todo el mundo los compra, motores, cebadores de tubos fluorescentes, un sinnúmero de dispositivos que despilfarran energía. El sector energético devora en estos momentos un cuarto de sus fondos para el desarrollo, desviando el dinero de otros proyectos vitales. De tal situación son parcialmente responsables los países industrializados, porque muchos de ellos han exportado vehículos y maquinaria ineficientes al mundo en desarrollo. Exportar ineficiencia es tan inmoral como antieconómico; en cambio, los países más ricos deberían ayudar a los países en vías de desarrollo a construir infraestructuras de bajo consumo que liberasen capital para afrontar otras necesidades apremiantes. Por ejemplo, fabricar lámparas y ventanas eficientes necesita 1000 veces menos capital que construir centrales eléctricas y redes de distribución para las mismas funciones, con la ventaja añadida de que la inversión se recupera diez veces más deprisa.

China e India saben ya que sus florecientes economías no pueden seguir compitiendo si el derroche energético continúa dilapidando dinero, talento y salud pública. China se está fijando unas metas ambiciosas, pero alcanzables, para pasar del carbón a fuentes renovables descentralizadas y al gas natural. (Los chinos disponen de grandes reservas de gas natural y se espera que pongan en explotación vastos yacimientos en Siberia oriental.) Además, en 2004 China anunció una nueva estrategia energética, que no se basa en grandes centrales, sino en la generación descentralizada y en rápidas mejoras en la eficiencia de los nuevos edificios, fábricas y artículos de consumo. Asimismo, está tomando medidas para contener la explosión del consumo de petróleo; en 2008 será ilegal allí vender muchos de los actuales e ineficientes coches americanos. Si los fabricantes de automóviles de otros países no innovan rápidamente, dentro de una década pudiera muy bien ocurrir que el lector conduzca un coche de bajísimo consumo de manufactura china.

La cada vez más competitiva economía global está estimulando un fascinante nuevo modelo de inversión energética. Si los Gobiernos pueden eliminar las barreras institucionales y aprovechar el dinamismo de la libre empresa, los mercados favorecerán por naturaleza las decisiones que generen bienestar, protejan el clima y propicien una seguridad auténtica al sustituir los combustibles fósiles por alternativas más económicas. ■

PARA SABER MÁS

Hypercars, hydrogen and the automotive revolution. A. B. Lovins y D. R. Cramer en *International Journal of Vehicle Design*, vol. 35, n.º 1-2, págs. 50-85; 2002.

Winning the oil endgame. A. B. Lovins, E. K. Datta, O. E. Bustness, J. G. Koomey y N. J. Glasgow. Rocky Mountain Institute, 2004.

SciLogs



www.scilog.es  

La mayor red de blogs de investigadores científicos



En perspectiva

Del mundo subatómico al cosmos

Cristina Manuel Hidalgo
Instituto de Ciencias del Espacio



Power-ups

La conexión entre los juegos y el aprendizaje

Ruth S. Contreras Espinosa
Universidad Politécnica de Cataluña



El rincón de Pasteur

El mundo invisible de los microorganismos

Ignacio López Goñi
Universidad de Navarra



Perspectiva de Física y Universidad

Política científica, gran ciencia y mundo académico

Ramón Pascual de Sans
Universidad Autónoma de Barcelona



La bitácora del Beagle

Avances en neurobiología

Julio Rodríguez
Universidad de Santiago de Compostela

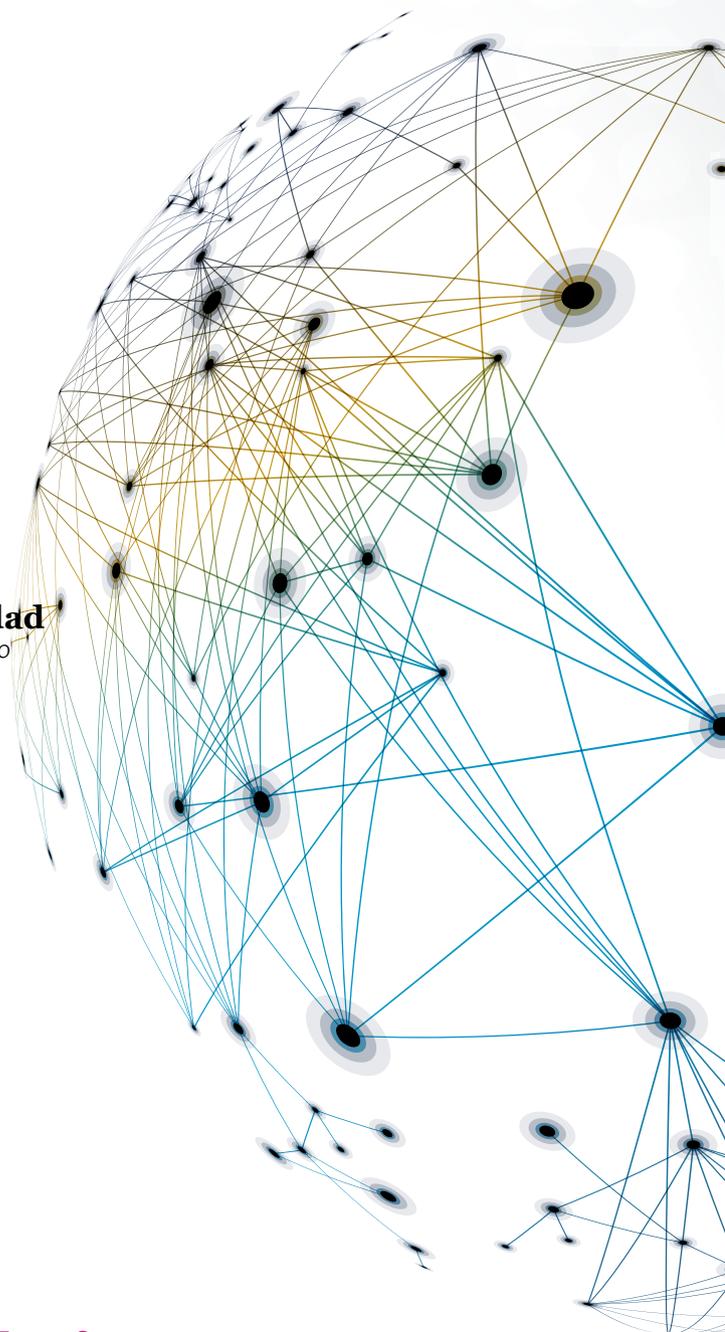


Cuantos completos

Tecnologías cuánticas y mucho más

Carlos Sabín
Instituto de Física Fundamental del CSIC

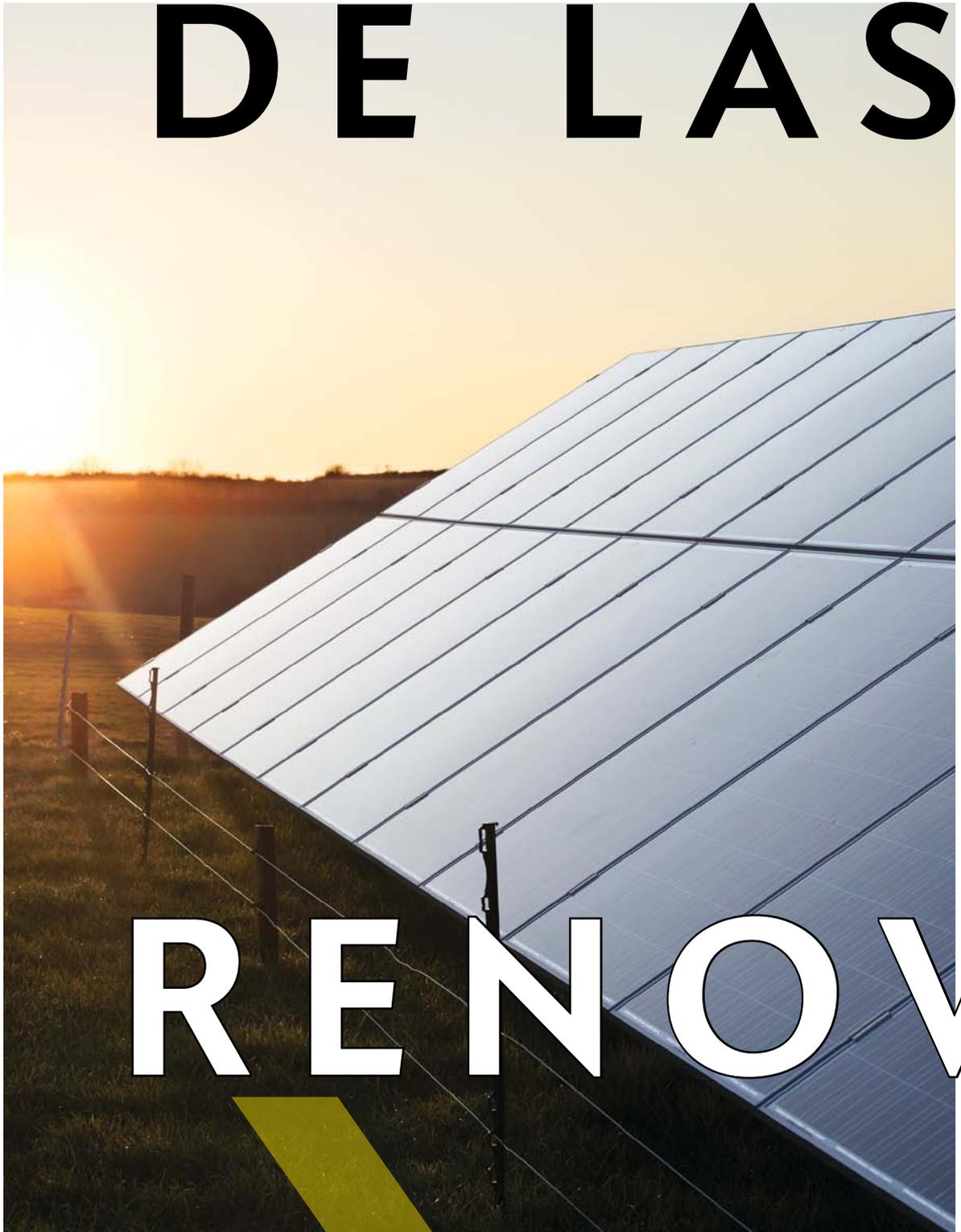
Y muchos más...



¿Eres investigador y te gustaría unirte a SciLogs?

Envía tu propuesta a redaccion@investigacionyciencia.es

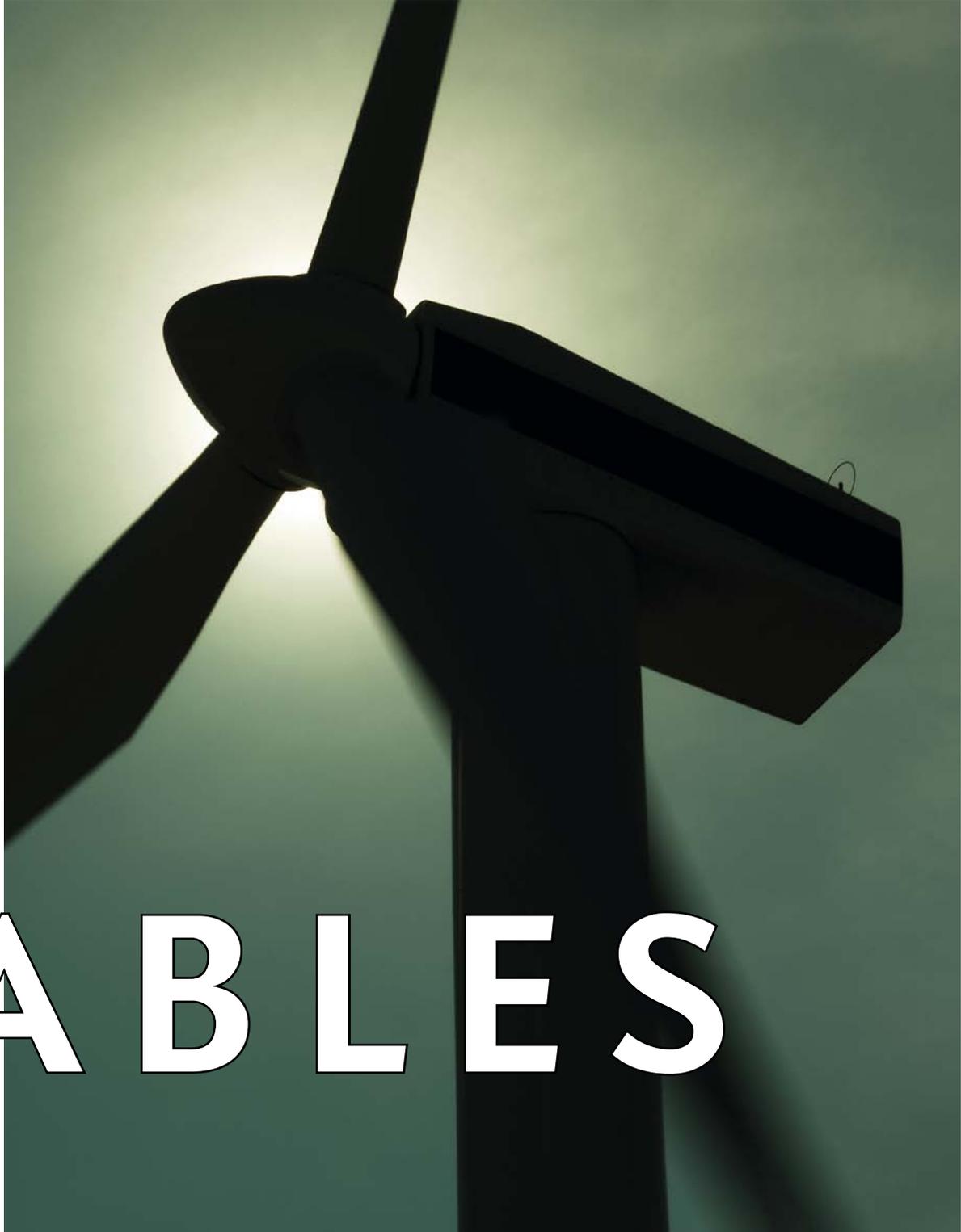
EL LENTO DE LAS



RENOV

No hay ninguna razón para esperar una transición rápida hacia un

ASCENSO



ABLES

modelo energético basado en alternativas a los combustibles fósiles

Vaclav Smil

Vaclav Smil es profesor emérito de la Universidad de Manitoba y autor de más de treinta libros sobre energía y medioambiente.



LAS FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA PODRÍAN CONQUISTAR EL MUNDO EN UN SOLO ASALTO.

Así pensaba en 1976 Amory Lovins, conocido defensor de las energías alternativas. Para el año 2000, auguraba Lovins, el 33 por ciento de la energía de EE.UU. procedería de una multitud de pequeñas fuentes no perezosas y descentralizadas. Decenios más tarde, en julio de 2008, Al Gore proclamaba que refundar el suministro eléctrico de EE.UU. en diez años era «factible, asequible y transformativo». Poco después, Mark Jacobson y Mark Delucchi proponían desde estas páginas un plan para reconvertir el sistema energético mundial en solo dos décadas [véase «Energía sostenible: Objetivo 2030», por M. Jacobson y M. Delucchi; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2010].

EN SÍNTESIS

Cada una de las grandes transiciones energéticas mundiales —de la madera al carbón y de este al petróleo— ha necesitado entre 50 y 60 años. Se prevé que la actual mudanza hacia el gas natural también se demore varios decenios.

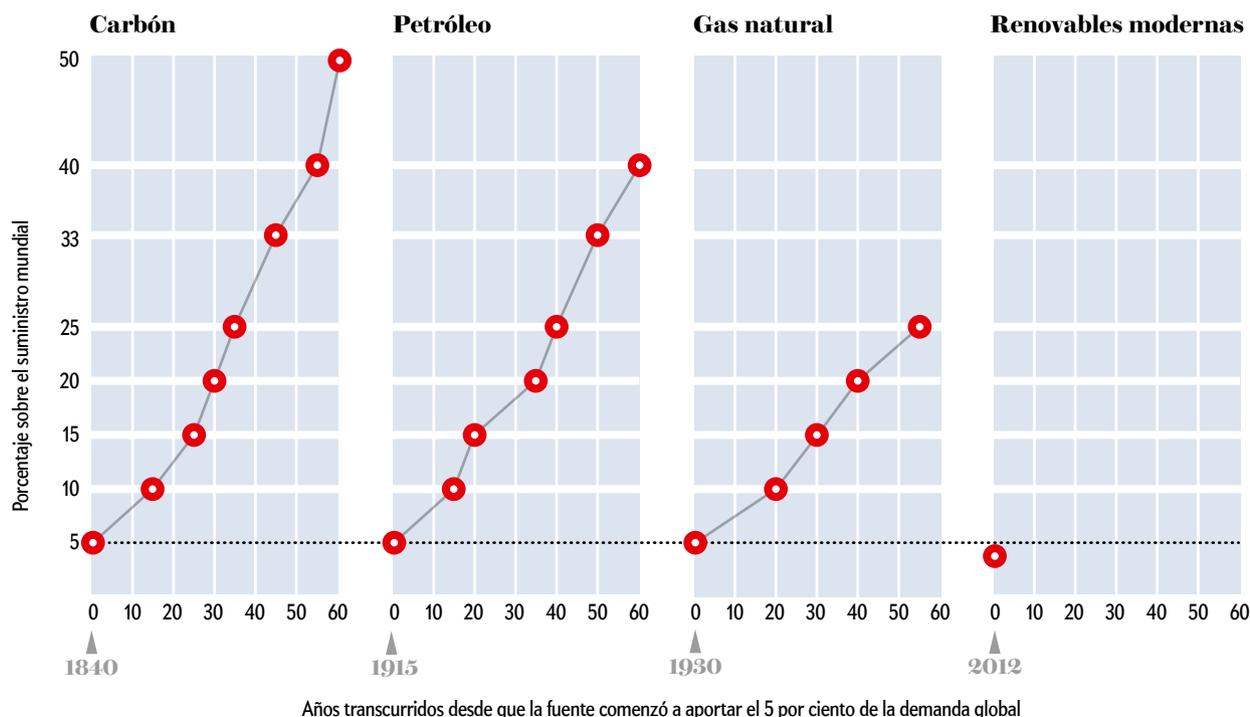
Nada indica que la transición a las renovables vaya a ser más rápida. Las alternativas «antiguas», como la hidroeléctrica, ya no dan más de sí. Y la eólica, la solar o los biocombustibles apenas cubren un porcentaje ínfimo de la demanda.

Con todo, algunas políticas podrían facilitar el cambio. Entre ellas, no subvencionar técnicas cortoplacistas, asegurar que los precios reflejen los costes ambientales y sanitarios, y mejorar la eficiencia energética.

Abrirse hueco en el mercado energético

En los últimos dos siglos, cada fuente energética que ha alcanzado una posición de dominio ha necesitado entre 50 y 60 años para lograrlo. El carbón, que desplazó a la madera, tardó desde 1840 hasta 1900 en pasar del 5 al 50 por ciento del suministro mundial. El petróleo, que aún no ha llegado al

50 por ciento, ascendió a un ritmo casi idéntico. El gas natural, probable sucesor del petróleo, procede aún con mayor lentitud. Hoy, las energías renovables «modernas» (eólica, solar, geotérmica y biocombustibles) apenas dan cuenta de un 3,4 por ciento de la producción mundial.



Pero, entre 1990 y 2012, la fracción de la energía mundial obtenida a partir de combustibles fósiles apenas descendió del 88 al 87 por ciento. En 2011, las renovables contribuían con menos del 10 por ciento al abastecimiento de EE.UU., la mayoría mediante técnicas «viejas», como la hidroeléctrica o la quema de restos madereros. Tras más de 20 años de generosas subvenciones, las nuevas fuentes, como la eólica y la solar, y los biocombustibles modernos, como el etanol de maíz, solo cubren el 3,35 por ciento del suministro energético del país.

Esa lentitud no debería sorprender a nadie. Tanto en EE.UU. como en el resto del mundo, cada vez que un combustible ha sido reemplazado por otro, el proceso ha durado entre 50 y 60 años. Así ocurrió con el paso de la madera al carbón y, más tarde, con el cambio del carbón al petróleo. EE.UU. está atravesando ahora su tercera gran transición energética: la del carbón y el petróleo hacia el gas natural. Entre 2001 y 2012, mientras el consumo de carbón cayó un 20 por ciento y el de crudo un 7 por ciento, el de gas natural creció un 14 por ciento. Pero, aunque el gas natural sea abundante, relativamente limpio y asequible, aún pasarán uno o dos decenios antes de que arrolle al carbón, un combustible que todavía genera más de un tercio de la electricidad de EE.UU.

Las renovables no están despegando más rápido que ninguna otra fuente energética, y no hay razones técnicas ni económicas para creer que vayan a hacerlo. En parte, porque la demanda global de energía no deja de crecer: al gas natural ya le costará

seguir ese ritmo, y las renovables lo tendrán aún más difícil. Puede que en algunos países el cambio suceda a mayor velocidad, pero, desde una perspectiva mundial, la transición a las renovables será lenta; sobre todo, mientras dure la actual mudanza al gas natural. Por supuesto, siempre podrá surgir una técnica rompedora o una política revolucionaria, pero cualquier cambio de modelo llevará largo tiempo.

MADERA, CARBÓN Y PETRÓLEO

La gran esperanza actual en una transición rápida hacia las renovables no es más que producto del voluntarismo y de una interpretación errónea de la historia reciente. Existe la creencia generalizada de que, en el siglo XIX, el consumo energético mundial estuvo dominado por el carbón; en el XX, por el petróleo, y que nuestro siglo pertenecerá a las fuentes alternativas. Las dos primeras impresiones son falsas; la última, discutible.

Aun con el auge de la maquinaria industrial, el siglo XIX no funcionó con carbón, sino con madera, carbón vegetal y residuos de cosecha (en su mayoría, paja de cereales). Estos generaron el 85 por ciento de la energía mundial, estimada en unos 2,4 yottajulios (YJ, 10^{24} julios). El carbón alcanzó el 5 por ciento de toda la energía procedente de combustibles hacia 1840. Pero, en 1900, apenas satisfacía la mitad de la demanda. Pasar del 5 al 50 por ciento le llevó entre 50 y 60 años. Varias estadísticas estadounidenses fiables apuntan a 1885 como el año en que la energía generada por combustibles fósiles (prin-

principalmente carbón, algo de crudo y una pequeña cantidad de gas natural) superó a la procedente de madera y carbón vegetal. Ese vuelco ocurrió en 1875 en Francia y en 1901 en Japón, pero no llegó a la URSS hasta 1930, a China hasta 1965 y a la India hasta finales de los sesenta.

Por otro lado, la principal fuente de energía en el siglo xx no fue el petróleo, sino el carbón. Los carbones bituminosos y los lignitos alcanzaron la mayor fracción del consumo mundial de combustibles, con un 55 por ciento durante la década de 1910. El crudo no superó al carbón hasta 1964. Pero, dado que el declive del carbón se vio acompañado de un incremento de la demanda energética global, en términos absolutos fue el carbón, y no el petróleo, el principal combustible del siglo xx. La contribución del primero se calcula en unos 5,3 YJ, frente a los 4 YJ del petróleo. Hasta hoy, solo dos grandes economías han completado la tercera transición de los combustibles fósiles: en la URSS, el consumo de gas natural superó al de crudo en 1984; en el Reino Unido, en 1999.

Para ver lo graduales y prolongadas que resultan las transiciones energéticas, merece la pena representar la evolución temporal de la fracción correspondiente a cada tipo de combustible. Para cada uno de ellos, la curva comienza cuando llega al 5 por ciento del suministro total (*véase el recuadro en la página anterior*). Las tres grandes transiciones que hemos mencionado presentan intrigantes similitudes. El carbón alcanzó el 5 por ciento del mercado global hacia 1840, el 10 por ciento en 1855, el 15 por ciento en 1865, el 20 por ciento en 1870, el 25 por ciento en 1875, el 33 por ciento en 1885, el 40 por ciento en 1895 y el 50 por ciento en 1900. La secuencia de años hasta cada hito fue 15-25-30-35-45-55-60. En cuanto a la transición al petróleo, iniciada en 1915 con una fracción del 5 por ciento, los intervalos fueron prácticamente idénticos.

El gas natural supuso el 5 por ciento del mercado global de combustibles en 1930. Después, alcanzó las mismas cuotas que el carbón y el petróleo en una secuencia de 20-30-40-55 años (aún debe llegar al 33 por ciento del suministro global). Al comparar los datos, vemos que tardó bastante más que los otros dos combustibles en llegar al 25 por ciento: unos 55 años, frente a los 35 del carbón y los 40 del petróleo.

Por supuesto, tres secuencias no bastan para predecir el ritmo de las transiciones futuras. Y si una verdadera revolución técnica lograra una energía nuclear asequible y segura, o si se desarrollasen medios eficientes para almacenar la producción eólica y solar, no cabe duda de que el cambio se precipitaría. Pero no dejan de resultar notorias las similitudes entre las tres transiciones energéticas que hemos vivido en dos siglos, sobre todo si tenemos en cuenta que cada combustible exigió sus propias técnicas de producción, canales de distribución y maquinaria. A escala mundial, la inversión e infraestructura necesarias para que una nueva fuente de energía alcance una fracción considerable del mercado requiere dos o tres generaciones: entre 50 y 75 años.

EL COMPLEJO CAMBIO A LAS RENOVABLES

Hasta ahora, las técnicas de producción alternativas han evolucionado con la misma lentitud. En 2011 supusieron el 9,39 por ciento de la energía generada en EE.UU.: 9,637 exajulios (EJ, 10¹⁸ julios), sobre un total de 102,7 EJ consumidos. Las fuentes

renovables tradicionales suministraron el 6,01 por ciento: las centrales hidroeléctricas, el 3,25 por ciento; la madera (en su mayoría, residuos de explotaciones madereras), el 2,04 por ciento, y el resto fue de origen geotérmico y biomasa. Las fuentes alternativas «modernas» siguieron siendo insignificantes. Los biocombustibles líquidos aportaron el 2,0 por ciento; la energía eólica, el 1,19 por ciento, y la solar, el 0,16 por ciento. Esos 3,35 puntos porcentuales procedentes de las nuevas fuentes de energía representan una cifra importante. Prácticamente todo el crecimiento futuro en el suministro renovable de EE.UU. tendrá que provenir de ellas, ya que el potencial de crecimiento de las fuentes tradicionales, sobre todo la hidroeléctrica, es muy limitado.

Son varias las razones que dificultan la transición a las renovables. El primero es la escala. En 2012, el consumo mundial

Una transición gradual requerirá reducir el consumo energético. Cuanto más rápido crezca este, tanto más difícil resultará cubrir una fracción considerable

de energía procedente de combustibles fósiles ascendió a unos 450 EJ: veinte veces más que entre 1890 y 1900, cuando el carbón desplazaba a la madera. Solo esa cantidad de energía ya resulta sobrecogedora, sea cual sea la fuente.

Otro factor reside en la naturaleza intermitente de las energías eólica y solar. Las sociedades modernas necesitan un suministro eléctrico fiable e ininterrumpido, con una demanda nocturna cada vez mayor para la climatización y las infraestructuras de las grandes urbes, desde vagones de metro hasta servidores de Internet. En EE.UU., las centrales de carbón y las nucleares se ocupan de suministrar la «carga base» (la parte producida sin interrupción durante las 24 horas). Las centrales hidroeléctricas y las de gas natural, que pueden encenderse y apagarse con rapidez, acostumbran a proveer la energía adicional necesaria para satisfacer los picos de demanda, cortos pero, a ciertas horas, muy superiores a la carga base.

Las energías eólica y solar pueden contribuir a la carga base, pero por sí solas no pueden cubrirla por completo: el viento no siempre sopla y el sol no siempre brilla, por lo que su suministro no es fiable. En países como Alemania, donde las renovables han crecido de manera sustancial, la eólica y la solar pueden sumar todo un abanico de porcentajes: desde una cantidad ínfima hasta casi la mitad de la demanda en las horas en que el viento sopla con fuerza y luce el sol. Pero semejantes fluctuaciones requieren el apoyo de otras centrales, por lo general de carbón o gas, o bien aumentar las importaciones de electricidad, lo cual puede causar graves trastornos en el flujo de electricidad de países vecinos.

Si las compañías eléctricas dispusieran de un procedimiento económico para almacenar los excedentes de energía solar y eólica generados durante los períodos de baja demanda, la expansión de las renovables procedería mucho más rápido. Por

desgracia, tras decenios de desarrollo solo se ha encontrado una buena solución a gran escala: bombear agua hasta un embalse elevado, para luego dejarla fluir y que accione un turbogenerador. Pero no hay muchos emplazamientos que ofrezcan los desniveles ni el espacio necesarios para aplicar la técnica; además, en ocasiones el proceso implica pérdidas netas de energía.

Otra alternativa consistiría en construir un vasto sistema de granjas eólicas y solares en un área muy extensa (del tamaño de un gran país o de medio continente) y conectarlas mediante líneas de transmisión. Una red así maximizaría la posibilidad de que siempre hubiese centrales suministrando energía a la red general. Hoy resulta técnicamente viable fabricar líneas de transmisión mejores y de mayor longitud, pero resultan caras de construir y a menudo deben enfrentarse a una fuerte oposición local. De hecho, la aprobación de nuevas líneas en EE.UU. y Alemania procede con lentitud.

Al final, una adopción masiva de energías renovables exigiría reconfigurar por completo la infraestructura energética. En lo que se refiere a la electricidad, ello supondría pasar de un número relativamente reducido de grandes centrales térmicas e hidráulicas a uno mucho mayor de instalaciones eólicas y solares menores y más distribuidas. Para los combustibles líquidos, se requeriría abandonar la extracción de petróleo, muy energético, en favor de la producción de biocombustibles de menor rendimiento. En numerosos aspectos, la transición a las renovables se muestra más exigente que los cambios anteriores al petróleo y al gas natural.

La principal razón de que las transiciones energéticas se demoren tanto obedece al tremendo coste que implica sustituir una infraestructura gigantesca. Aunque la energía renovable fuera gratis, resultaría impensable que países, empresas y municipios abandonaran las enormes inversiones realizadas en instalaciones para combustibles fósiles: desde minas de carbón, pozos de petróleo, oleoductos y refinerías hasta millones de gasolineras locales. Se estima que el valor de dicha infraestructura en todo el mundo asciende a no menos de 20 billones de dólares. Solo China gastó medio billón de dólares para añadir 300 gigavatios a su capacidad de producción en centrales de carbón entre 2001 y 2010 (más que toda la capacidad generadora de origen fósil de Alemania, Francia, Reino Unido, Italia y España juntas). El país espera que esas centrales presten servicio durante al menos 30 años. Ningún Estado tiraría por la borda una inversión así.

¿QUÉ HACER?

Seamos claros. Abundan las razones de índole ambiental para reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Aparte de las emisiones de gases de efecto invernadero, su quema emite óxidos de azufre y nitrógeno, causantes de lluvia ácida y esmog fotoquímico; hollín, que también contribuye al calentamiento global, y metales pesados perjudiciales para la salud. Además, su uso contamina las aguas y estropea las tierras. Abandonarlos sería sin duda deseable, si bien algunas alternativas conllevan sus propios impactos ambientales.

La verdadera pregunta es cómo conseguir una transición eficaz. Saber que el cambio tardará decenios en llegar permite aclarar unas cuantas opciones. Hasta ahora, la política energética de EE.UU. y del resto del mundo ha sido funesta. En vez de modas cortoplacistas propiciadas por el voluntarismo, necesitamos políticas a largo plazo basadas en expectativas realistas y tomar decisiones que luego no nos pesen, en lugar de compromisos apresurados y mal concebidos.

Una manera de lograrlo pasa por no elegir ningún caballo ganador. Los Gobiernos no pueden predecir qué investigaciones más o menos prometedoras llegarán primero al mercado, por lo que no deberían apostar por supuestos vencedores para después abandonarlos por la siguiente opción de moda (al respecto, baste recordar los reactores reproductores rápidos o los coches de hidrógeno). La mejor estrategia consiste en diversificar la inversión. ¿Quién habría adivinado en 1980 que, durante las tres décadas siguientes, la mayor recompensa no vendría de los reactores nucleares ni de las placas fotovoltaicas, sino de la perforación horizontal y la fracturación hidráulica de los depósitos de esquisto?

Los Gobiernos tampoco deberían conceder grandes subvenciones ni avalar préstamos a empresas que se dedican a subirse al carro de la última moda. Así ocurrió en EE.UU. con Solyndra, un fabricante de sistemas fotovoltaicos que recibió 535 millones de dólares solo para quebrar después. Es cierto que las subvenciones pueden acelerar un cambio incipiente, pero deben estar guiadas por valoraciones realistas y compromisos firmes, no saltar de una gran «solución» a otra.

Al mismo tiempo, el precio de cualquier fuente de energía debería reflejar los costes reales de generación, los cuales comprenden las repercusiones ambientales y sanitarias tanto a corto como a largo plazo. Tales impactos incluyen los gases de efecto invernadero y el hollín emitidos por los combustibles fósiles; la erosión del suelo, las escorrentías de nitrógeno y la merma de agua provocadas por el cultivo de maíz para etanol; así como el coste de una extensa red de alta tensión para enlazar granjas eólicas y solares dispersas. Este ejercicio de realismo puede revelar las ventajas a largo plazo de cada fuente de energía.

El mejor modo de acelerar la transición gradual hacia las energías renovables es reducir el consumo global. Cuanto más rápido crezca la demanda, tanto más difícil será satisfacer una fracción considerable. Algunos estudios recientes han demostrado que no existen problemas técnicos insuperables para reducir el consumo energético en un tercio, ni en los países desarrollados ni en los emergentes, principalmente con medidas de eficiencia energética. Conforme se reduzca la demanda, podrán ir retirándose los combustibles fósiles. Los ciudadanos y los dirigentes de los países ricos deben también aceptar que, durante el último medio siglo, el precio de la energía, por más que haya aumentado, se ha mantenido extraordinariamente bajo en términos históricos. Esos países deberían pagar más para responder de las consecuencias ambientales y sanitarias.

Tanto a una escala nacional como mundial, las transiciones energéticas constituyen procesos lentos. Cambiar los combustibles fósiles por energías renovables no será una excepción: requerirá generaciones de perseverancia. 

PARA SABER MÁS

Energy transitions: History, requirements, prospects. Vaclav Smil. Praeger, 2010.
Monthly Energy Review. U.S. energy information administration.
www.eia.gov/mer

EN NUESTRO ARCHIVO

Energía y sostenibilidad. Temas de *JyC* n.º 67, 2012.
Atrapar el viento. Davide Castelvecchi en *JyC*, abril de 2012.
El futuro de la energía solar. Bernd Müller en *JyC*, mayo de 2012.
El futuro de la energía eólica. Gerhard Samulat en *JyC*, junio de 2012.

LA OPCIÓN NUCLEAR

Si la energía generada en todo el mundo por reactores nucleares se triplicase, la atmósfera se ahorraría cada año mil o dos mil millones de toneladas de carbono

John M. Deutch y Ernest J. Moniz

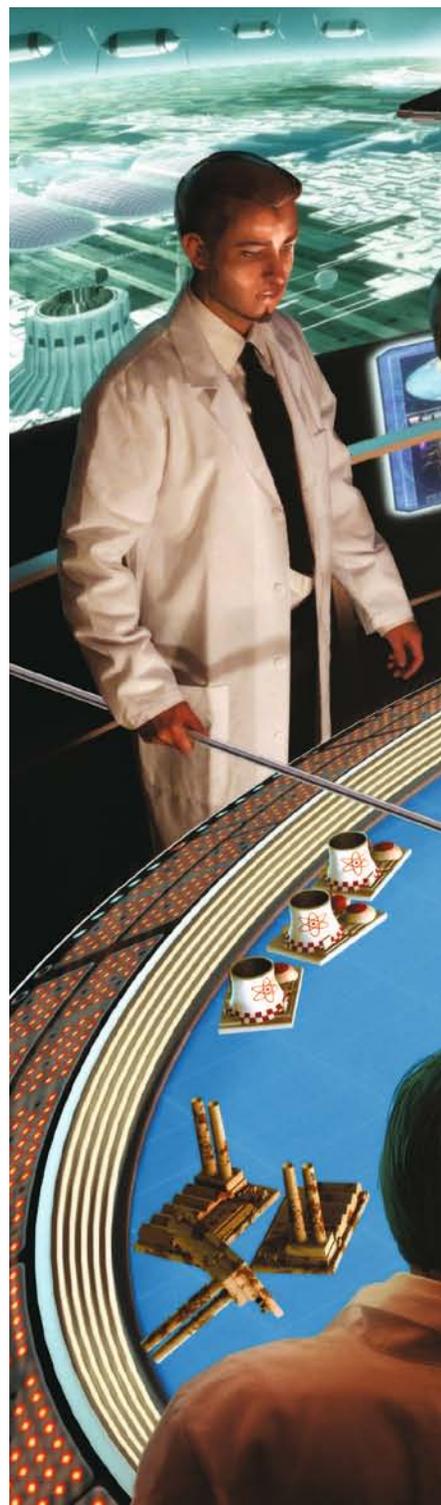
LA ENERGÍA NUCLEAR PROVEE UNA SEXTA PARTE DE LA electricidad del mundo. Tras la hidroelectricidad (que aporta algo más de un sexto), constituye la fuente principal de energía «libre de carbono». Sufrió una crisis de crecimiento, de la que queda indeleble recuerdo por los accidentes de Chernobyl y de Three Mile Island. Pero, en los últimos tiempos, las centrales nucleares han demostrado una fiabilidad y un rendimiento notables. Las existencias mundiales de uranio podrían alimentar el funcionamiento de un parque de reactores mucho mayor que el actual, a lo largo de sus cuarenta o cincuenta años.

EN SÍNTESIS

Se prevé que el consumo mundial de electricidad haya aumentado un 160 por ciento para el año 2050.

La construcción de centenares de centrales nucleares podría cubrir el crecimiento de la demanda sin grandes nuevas emisiones de dióxido de carbono.

Para que pueda llevarse a cabo hay que abaratar la edificación de las centrales, elaborar un plan de almacenamiento de residuos y evitar la proliferación de armas nucleares.



KENN BROWN

LOS GOBIERNOS Y LAS COMPAÑÍAS ELÉCTRICAS piensan en una nueva tanda de construcciones de centrales nucleares que contribuirían a satisfacer la creciente demanda de electricidad.



Con la creciente preocupación por el calentamiento global, y la consiguiente posibilidad de que se termine por regular las emisiones de gases de invernadero, no sorprende que gobiernos y compañías eléctricas piensen cada vez más en la construcción de más centrales nucleares. La generación de la misma cantidad de energía con combustibles fósiles tendría sus problemas. El gas natural resulta atractivo si se quieren limitar las emisiones carbónicas porque tiene un contenido de carbono más bajo que el de otros combustibles fósiles, y las plantas correspondientes requieren una inversión inferior. Pero el coste de la electricidad producida es muy sensible al precio del gas natural, que se ha vuelto más variable en estos últimos años. Aunque los precios del carbón resultan más bajos y estables, no hay fuente de electricidad que emita más carbono por watt. Para que la generación de electricidad mediante carbón pueda expandirse sin que suponga la emisión de cantidades inaceptables de carbono a la atmósfera, habría que demostrar la viabilidad de la captura y secuestro del dióxido de carbono en las centrales de carbón e implantar ese procedimiento a gran escala. Sin embargo, así aumentarían los costes.

Estas dificultades despiertan dudas acerca de las inversiones en nuevas plantas de gas o de carbón y apuntan a un posible renacimiento nuclear. Desde el año 2000, se han conectado a las redes eléctricas más de 20.000 megawatt de capacidad nuclear, sobre todo en Extremo Oriente. Con todo, y a pesar del interés evidente de los principales operadores nucleares, no se ha vuelto a proyectar ninguna central nuclear en los EE.UU. La construcción de nuevas nucleares tropieza con la elevada inversión necesaria y la incertidumbre en torno a la gestión de los residuos nucleares. Además, preocupa que la expansión global de la energía nuclear favorezca el deseo de ciertas naciones de contar con armas nucleares.

En el año 2003 codirigimos un estudio del Instituto de Tecnología de Massachusetts, *El futuro de la energía nuclear*, que analizaba las condiciones requeridas para que la opción nuclear se mantuviese viva. En él se describía una situación en la que la energía nuclear se triplicaba para el año 2050, hasta generar un millón de megawatt; le ahorra así al mundo entre 800 y 1800 millones de toneladas de carbono emitido al año, dependiendo de que las centrales nucleares sustituyesen a centrales de gas o de carbón. A esa escala, la energía nuclear contribuiría a la estabilización de las emisiones de gases de invernadero, para la que se necesita que se dejen de emitir anualmente, a la altura de 2050, alrededor de siete mil millones de toneladas de carbono.

EL CICLO DEL COMBUSTIBLE

Si la energía nuclear se expande de esa suerte, ¿qué clase de centrales atómicas deberían construirse? Una cuestión clave concierne al ciclo del combustible. Puede este ser abierto o cerrado. En un ciclo de combustible abierto, o ciclo de un solo paso, el uranio «se quema» una sola vez en un reactor, tras lo cual el combustible gastado se almacena en minas o depósitos subterráneos. El combustible gastado incluye plutonio, que podría extraerse químicamente y convertirse de nuevo en combustible para otra central nuclear. Esto da lugar a un ciclo de combustible cerrado, por el cual abogan algunos [véase «Residuos nucleares», por William H. Hannum, Gerald E. Marsh y George S. Stanford; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2006].

Ciertos países, sobre todo Francia, utilizan un ciclo de combustible cerrado que separa del combustible gastado el plutonio y lo lleva de nuevo a los reactores, incluido en una mezcla de

John M. Deutch y Ernest J. Moniz fueron copresidentes del estudio que el Instituto Tecnológico de Massachusetts publicó en 2003 con el título de *El futuro de la energía nuclear*. Deutch, profesor de química del MIT, fue vicesecretario de defensa de EE.UU. entre 1994 y 1995 y director de la CIA entre 1995 y 1996. Moniz enseña física en el MIT. Entre 2013 y 2017 fue secretario de energía de EE.UU. y, desde 2017, es director ejecutivo de la Iniciativa de Amenaza Nuclear (NTI).



óxidos de plutonio y de uranio. A más largo plazo, cabe pensar en reciclar todos los transuránidos (el plutonio entre ellos) en un reactor de los llamados rápidos (es decir, donde no se modera la velocidad de los neutrones). De ese modo, se eliminarían casi todos los componentes de vida media muy larga presentes en los residuos. El debate acerca de los residuos nucleares tomaría un cariz completamente diferente. Sin embargo, se necesita mucha investigación para resolver los espinosos problemas técnicos y económicos de semejante planteamiento.

Podría parecer que el reciclaje de los residuos tiene todas las ventajas: se utiliza menos materia prima para la misma energía total producida y se atempera el problema del almacenamiento de larga duración de los residuos, pues sería menor la cantidad de material radiactivo que habría que guardar durante miles de años.

No obstante, creemos que en las próximas décadas habrá de preferirse el ciclo abierto. En primer lugar, el combustible reciclado es más costoso que el uranio original. En segundo, parece haber uranio suficiente para que el ciclo de un solo paso pueda sustentar una generación triplicada de energía nuclear a lo largo de los 40 o 50 años de vida de las centrales. En tercer lugar, la ventaja ambiental del almacenaje a largo plazo queda compensada por los riesgos ambientales a corto plazo del reprocesado y la fabricación del combustible, que son tratamientos complejos y peligrosos. Por último, el reprocesado que se efectúa en un ciclo de combustible cerrado produce plutonio que puede derivarse hacia la fabricación de armas nucleares.

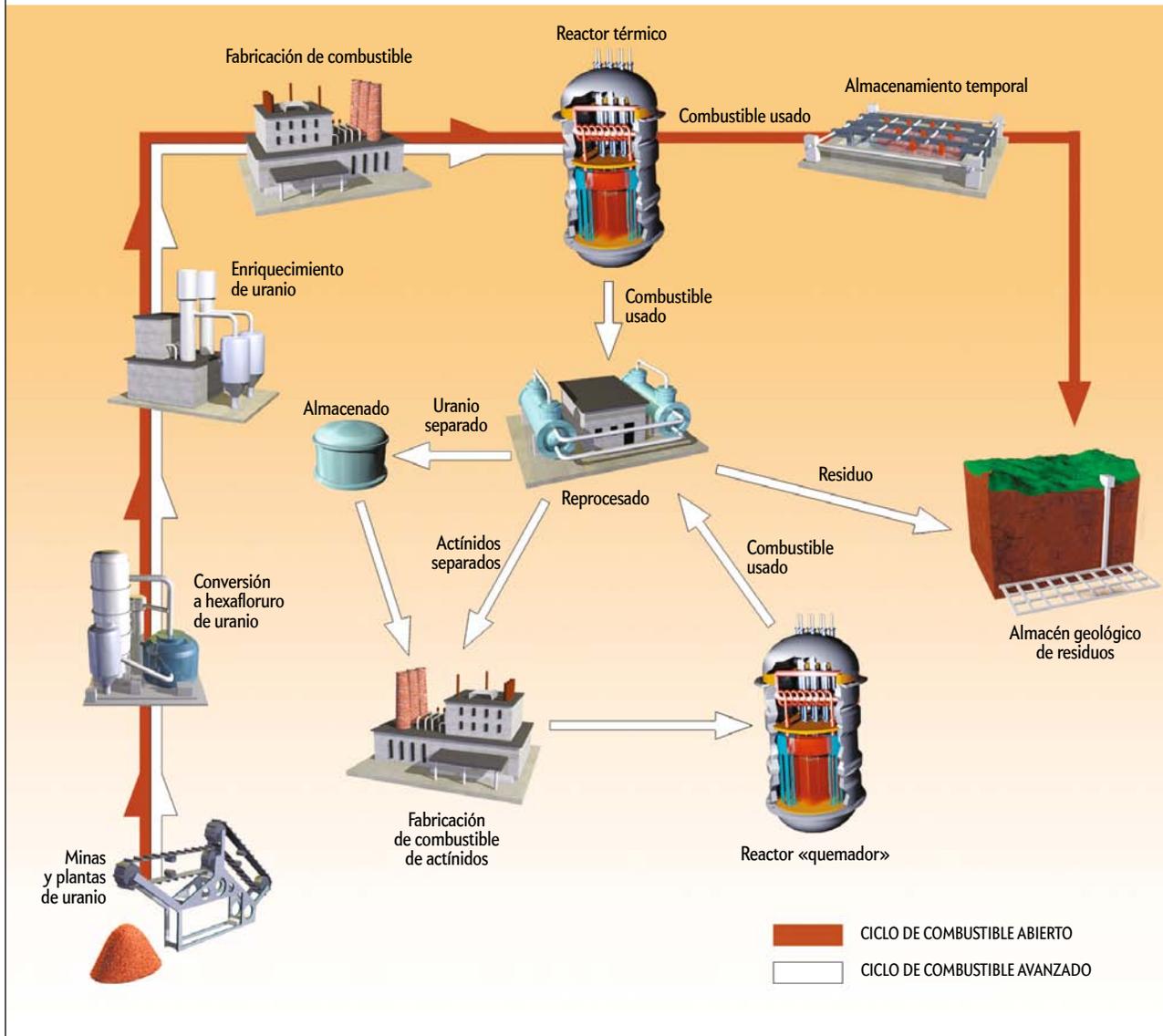
El tipo de reactor que se seguirá prefiriendo durante los próximos veinte años, o más, es aquél en el que se refrigera y modera los neutrones con agua ligera (agua ordinaria, en vez de agua pesada, que contiene deuterio). La inmensa mayoría de las centrales actuales pertenecen a esta clase; se trata de una técnica madura, bien conocida.

Los diseños de los reactores se dividen en generaciones. Los primeros prototipos de reactores, construidos en los años cincuenta y principios de los sesenta, constituían, a menudo, piezas únicas. Los reactores de la generación II, en cambio, se construyeron en gran número, desde finales de los años sesenta hasta principios de los noventa, para su explotación comercial. Los reactores de la generación III incorporan diversas mejoras en el combustible y la seguridad pasiva: en caso de un accidente, el reactor se apagaría solo, sin que tuviesen que intervenir los técnicos. El primer reactor de la generación III se construyó en Japón en 1996. Entre los reactores de la generación IV, hoy en estudio, se cuentan los modelos de combustible granulado y los reactores rápidos enfriados por plomo [véase «Nueva generación de la energía nuclear», por James A. Lake, Ralph G. Bennett y John F. Kotek; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2002]. Los reactores de la generación III+ se asemejan a los de la generación III, aunque incorporan técnica más avanzada.

Ciclos de combustible preferidos

Los autores prefieren un ciclo de combustible abierto para los próximos decenios. En su decurso, el uranio se «quema» solo una vez en un reactor térmico (es decir, de neutrones cuya velocidad se ha moderado) y el combustible ya gastado se almacena en un depósito de residuos (*trayectoria en rojo*). Algunos países utilizan un ciclo cerrado, en el cual se extrae el plutonio del combustible gastado y se mezcla con uranio para reutilizarlo en un reactor térmico (*no se muestra*). En un futuro

lejano quizá sea factible, y preferible, un ciclo cerrado avanzado (*trayectoria en blanco*): el plutonio y otros elementos (actínidos), y quizás el uranio, del combustible gastado se reprocesarían y utilizarían en reactores «quemadores» (reactores que no contienen apenas material que pueda convertirse durante su funcionamiento en material fisionable); así se reduciría drásticamente la cantidad de residuos que requieren un almacenamiento de larga duración.



Con la posible excepción de los reactores de gas de alta temperatura (así, el de combustible granulado), no cabe esperar la explotación comercial de reactores de cuarta generación hasta dentro de decenas de años. Para evaluar nuestro panorama del año 2050, supusimos que se construyeran reactores de agua ligera de la generación III+.

Con el reactor modular de combustible granulado cabe pensar en centrales nucleares modulares. Una posibilidad interesante. En vez de construir grandes plantas de 1000 megawatt, podría disponerse de módulos de unos 100 megawatt. Este enfoque vendría muy bien en países en vías de desarrollo y en países

industrializados sin regulaciones, por la sencilla razón de que la inversión es mucho menor. Las grandes centrales tradicionales tienen la ventaja de la economía de escala, que da por resultado un costo más bajo por kilowatt; sin embargo, perderían esa ventaja si los módulos se construyesen en gran cantidad con los métodos eficientes de una producción industrial.

Sudáfrica se propone iniciar la construcción de una planta de prueba de combustible granular, con una potencia de 110 megawatt, en 2007. Debería terminarse en 2011. Para 2013 se planean módulos comerciales de cerca de 165 megawatt, con la esperanza de venderlos en África, sobre todo.

REDUCCIÓN DE COSTES

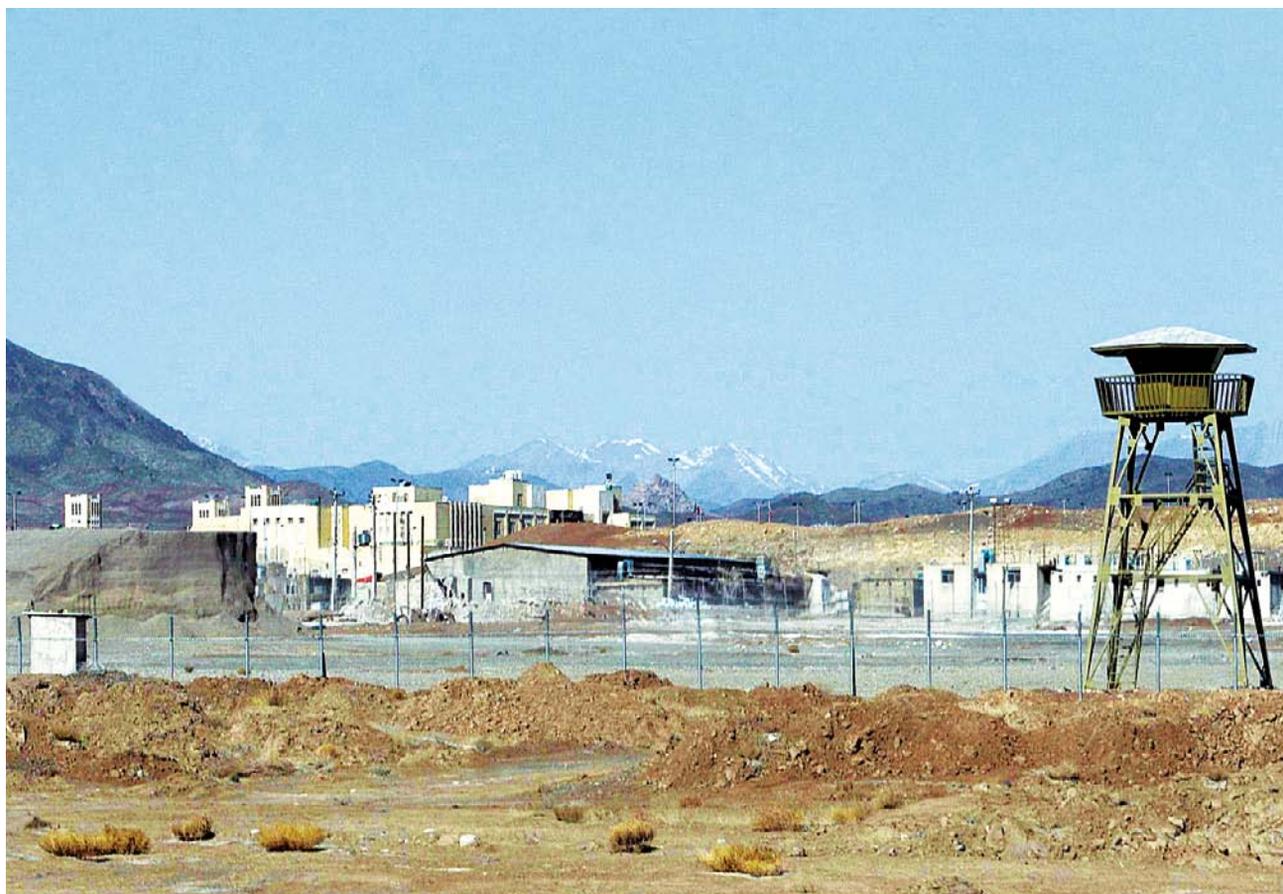
Según enseña la experiencia, la electricidad de una nueva central de energía nuclear sería hoy más costosa que la de una planta nueva de carbón o de gas. El estudio de 2003 del Instituto de Tecnología de Massachusetts, antes aludido, calculaba que los nuevos reactores de agua ligera producirían electricidad a un coste de 6,7 centavos de dólar por kilowatt-hora (determinado conforme a las condiciones económicas de EE.UU.). Esa cifra comprende todos los costes de una planta, repartidos a lo largo de su vida útil, incluido un beneficio aceptable para los inversores. Bajo hipótesis equivalentes, estimamos que una nueva central de carbón produciría electricidad a un coste de 4,2 centavos por kilowatt-hora. En el caso de una central nueva de gas, el coste, muy sensible al precio del gas natural, sería de unos 5,8 centavos por kilowatt-hora para un precio elevado del gas.

Habrán quienes duden de que se pueda evaluar el coste de la energía nuclear. Recordarán el exagerado optimismo que hubo en un principio, cuando se decía que sería «demasiado barata para medirla». Pero el análisis del MIT se basa en la experiencia acumulada y en el funcionamiento real de las plantas existentes, no en las promesas de la industria nuclear. Algunos se preguntarán también por las incertidumbres inherentes a tales proyecciones. Pero las estimaciones colocan las tres alternativas —energía nuclear, de carbón y de gas— en un mismo campo de juego y no hay

ninguna razón para esperar que las contingencias inesperadas favorezcan a una u otra. Además, cuando las compañías eléctricas deciden qué clase de central energética van a construir, basan sus decisiones en ese tipo de estimaciones.

Se podrían dar varios pasos para reducir el coste de la opción nuclear por debajo de nuestra cifra básica de 6,7 centavos por kilowatt-hora. Una recorte del 25 por ciento en los gastos de construcción bajaría el coste de la electricidad a 5,5 centavos por kilowatt-hora. Acortando el tiempo de construcción de una planta de cinco a cuatro años y mejorando el funcionamiento y el mantenimiento, podrían ahorrarse unos 0,4 centavos más por kilowatt-hora. La financiación de una central depende de las regulaciones que afectan a su establecimiento. Reducir los costes de capital de una central nuclear hasta igualarlos a los de una planta de gas o de carbón eliminaría la diferencia con el carbón (que cuesta 4,2 centavos por kilowatt-hora). Aunque estas eventuales reducciones en el coste de la energía nuclear resultan verosímiles —en especial si se construye un número importante de unidades a partir de unos pocos diseños comunes—, no está demostrado que puedan llevarse a cabo.

La energía nuclear se convierte en la preferible desde un punto de vista económico cuando se pone un precio a las emisiones de carbono. Llamaremos «impuesto del carbono» a esa medida, hecha la cautela de que no toda asignación de un precio significa establecimiento de un impuesto.



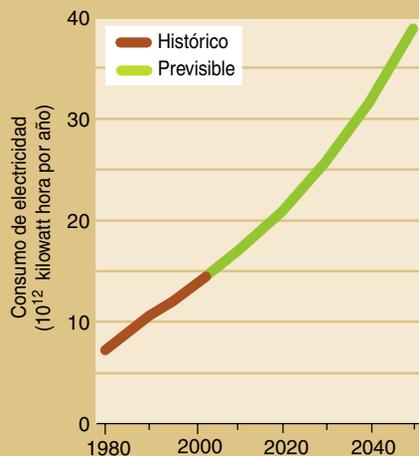
ESTA PLANTA de enriquecimiento de uranio de Natanz, Irán, viene preocupando últimamente, ya que podría utilizarse para fabricar uranio apto para armamento. Un acuerdo internacional por el cual los países «consumidores» alquilaran el combustible a los países «suministradores», los EE.UU. por ejemplo, en vez de construir sus propias plantas de enriquecimiento, aliviaría la inquietud por una posible proliferación del armamento nuclear.

Hacia el futuro

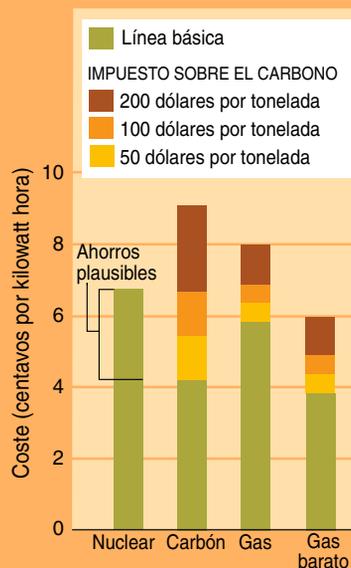
La demanda mundial de electricidad aumentará mucho en los próximos decenios (*abajo*). Para atender esa demanda, se deberán construir miles de centrales de energía nuevas. Uno de los factores de más peso a la hora de determinar su naturaleza será el coste estimado de la electricidad producida (*derecha*). No se construirán muchas centrales nucleares si no resultan competitivas con las plantas de carbón y gas. Si se logra que las centrales nucleares resulten competitivas, la producción mundial de energía nuclear se podría triplicar —con respecto a la del año 2000— para el 2050, según un estudio del MIT (*abajo*).

EL CONSUMO DE ELECTRICIDAD

Se prevé que el consumo mundial de electricidad haya aumentado en un 160 por ciento para el año 2050. La proyección (*verde*) utiliza las estimaciones demográficas de las Naciones Unidas y supone que el consumo per cápita aumentará cerca del 1 por ciento anual en los países desarrollados. Se suponen índices más altos de aumento para los países en vías de desarrollo, mientras alcanzan los niveles de uso del mundo desarrollado.



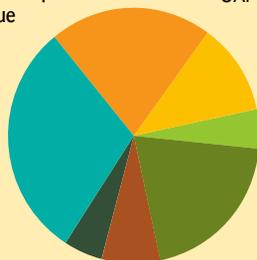
LOS PRECIOS



El coste de la electricidad previsto para las nuevas centrales de energía depende de muchos factores. Los impuestos sobre las emisiones de carbono podrían aumentar los costos de las de carbón y gas. Los de las nucleares podrían conocer reducciones gracias a mejoras verosímiles, pero no probadas.

¿QUIÉN TENDRÁ LA ENERGÍA?

La situación hipotética descrita por el estudio del MIT prevé que EE.UU. producirá alrededor de una tercera parte del millón de megawatt de electricidad que se obtendrán de la energía nuclear en el año 2050; el resto del mundo desarrollado produciría otro tercio.



CAPACIDAD DE GENERACIÓN, 2050

- EE.UU.
- Europa y Canadá
- Asia Oriental desarrollada
- Antigua Unión Soviética
- China, India y Pakistán
- Indonesia, Brasil y México
- Otros países en vías de desarrollo



▲ En construcción: una planta de energía nuclear avanzada (generación III+), de 1600-megawatt, en Olkiluoto, Finlandia.

En Europa, los permisos para emitir carbono se negocian en un mercado abierto. A comienzos de 2006, se vendían a más de 20 euros por tonelada de dióxido de carbono, aunque su precio ha caído ahora y se halla en torno a la mitad. Un impuesto de solo 50 dólares por tonelada de carbono sube el precio de la electricidad generada por carbón a 5,4 centavos por kilowatt-hora. A 200 dólares por tonelada de carbono sería ya muy alto, 9,0 centavos por kilowatt-hora. La electricidad generada con gas no subiría tanto: quedaría en 7,9 centavos por kilowatt-hora. Las plantas de combustible fósil escaparían de las tasas que gravasen las emisiones si secuestraran y confinaban el carbono, pero el coste de esta operación repercutiría en el precio como un impuesto.

Debido a que han pasado muchos años desde que se iniciara la última construcción de una planta nuclear en los EE.UU., las

compañías que levanten las próximas centrales nucleares se enfrentarán a costos adicionales que ya no existirán en obras subsiguientes; tendrán, además, que superar los escollos de una tramitación de los permisos de nuevo cuño. Para superar ese obstáculo, la Ley de Política Energética de 2005 incluyó algunas provisiones importantes, como un incentivo fiscal de 1,8 centavos por kilowatt-hora en favor de las nuevas centrales nucleares durante sus primeros ocho años de funcionamiento. Esa rebaja, o «incentivos a primeros», se aplica a los primeros 6000 megawatt de las nuevas centrales. Se han formado varios consorcios para aprovechar tales ventajas fiscales.

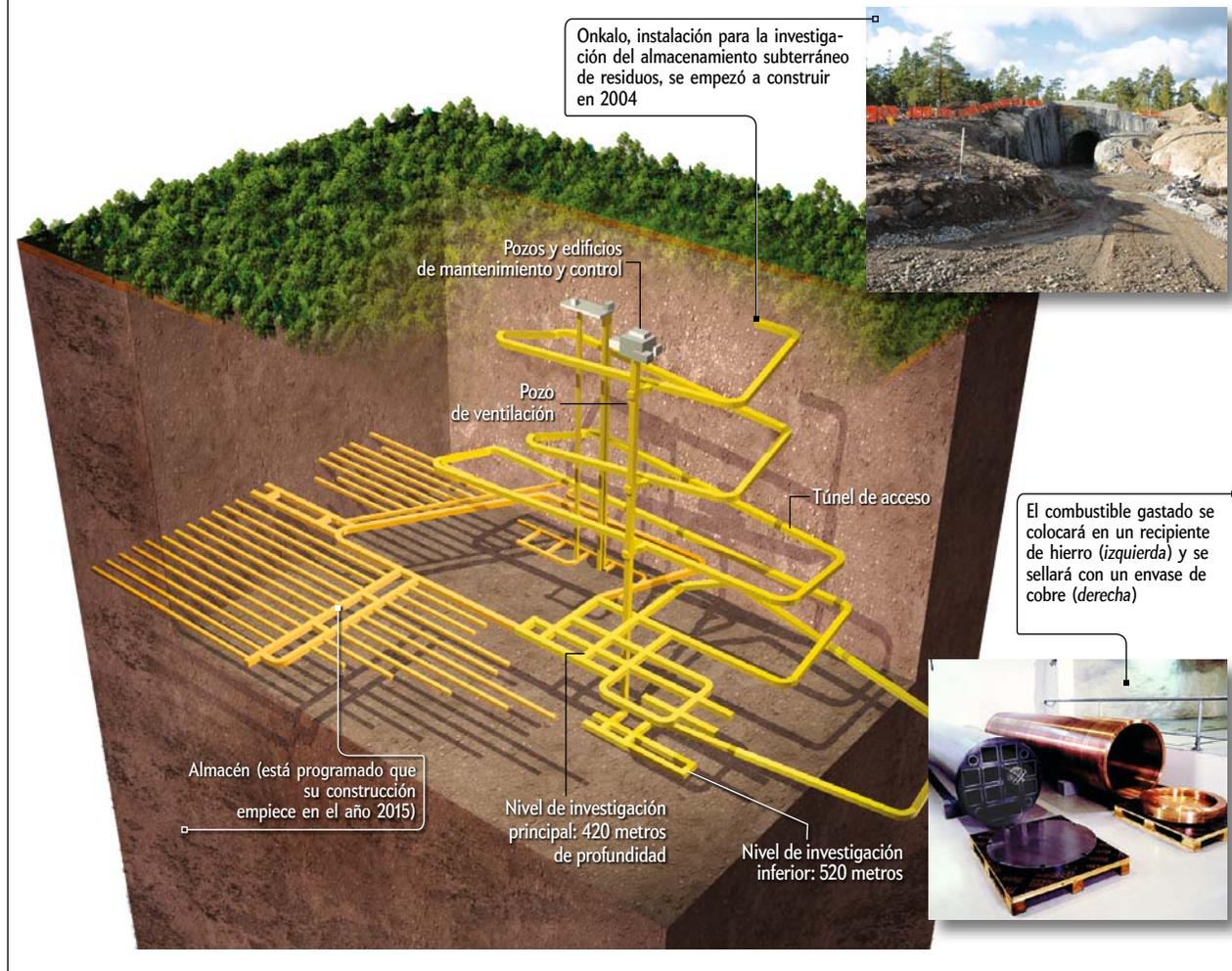
GESTIÓN DE RESIDUOS

El segundo gran obstáculo al que se enfrenta un renacimiento nuclear es la gestión de los residuos. Ningún país tiene a punto

Almacenamiento de residuos nucleares

Finlandia se dispone a abordar el almacenamiento subterráneo de residuos nucleares en Olkiluoto. Según el plan, las barras de combustible gastadas se encapsularán en grandes recipientes con una parte interna de hierro, para darles consistencia mecánica, y un grueso envase más externo, de cobre, para resistir a

la corrosión. Se los colocará en agujeros excavados en el suelo del túnel y rodeará de yeso, a fin de prevenir el flujo directo de agua a los recipientes. Esta instalación podría empezar a aceptar residuos de los cuatro reactores nucleares de Finlandia en el año 2020.



todavía un sistema que almacene permanentemente el combustible gastado y demás residuos radiactivos de las centrales nucleares. Se suele preferir el almacenamiento geológico: guardar los residuos en cámaras excavadas centenares de metros bajo tierra. Hay que prevenir las fugas de residuos durante muchos milenios; se combinan barreras de diferente tipo, tanto construidas (por ejemplo, los recipientes de los residuos) como geológicas (la estructura natural de la roca donde se ha excavado el compartimiento y las características de la cuenca hidrogeológica). Muchos años de estudio apoyan el almacenamiento geológico. Se conocen bien los procesos y acontecimientos que podrían transportar los radionúclidos desde el depósito hacia la biosfera. A pesar de esta fiabilidad científica, la aprobación de un depósito geológico sigue estando cargada de dificultades.

El almacén geológico por excelencia es la instalación propuesta en el monte Yucca, en Nevada, de la que se viene hablando desde hace más de veinte años. Hace poco se encontró que contenía bastante más agua que la supuesta. La aprobación

de ese depósito por la Comisión Reguladora Nuclear sigue en el aire.

El retraso en encontrar una manera de retirar definitivamente los residuos (aunque se apruebe su uso, es poco probable que el almacén del monte Yucca acepte residuos antes de 2015) quizá lastre la construcción de nuevas centrales nucleares. Por ley, el gobierno de Estados Unidos debería haber empezado antes de 1998 a trasladar el combustible, ya gastado, de los reactores a un depósito final. Que no se haya hecho así ha obligado a almacenar mayores cantidades en muchos lugares, con el consiguiente descontento de vecinos, ciudades y estados.

Finlandia podría ser el primer país que construya un almacén para sus residuos nucleares de alto nivel. En Olkiluoto, donde se encuentran dos reactores nucleares, ha comenzado la excavación de Onkalo, una instalación subterránea de investigación. Se extiende bajo tierra a lo largo de medio kilómetro; servirá para estudiar la estructura rocosa y los flujos de agua subterránea, y poner a prueba la técnica de almacenamiento

en esas condiciones subterráneas. Si todo va según los planes y se obtienen las licencias gubernamentales necesarias, los primeros recipientes de residuos podrían colocarse allí en 2020. Hacia 2130 el depósito estaría completo; las rutas de acceso se rellenarían y sellarían. El dinero para pagar la instalación se ha venido cargando en el precio de la energía nuclear finlandesa desde finales de los años setenta.

Para abordar en Estados Unidos el problema de la gestión de residuos, el gobierno debería adjudicarse el combustible gastado que ahora se almacena en las centrales repartidas por el país y juntar todas las remesas en uno o más sitios federales de almacenaje interino hasta que se disponga de una instalación permanente. Los residuos pueden almacenarse con garantías durante un período largo. Este almacenaje transitorio, que debería prolongarse incluso durante 100 años, tendría que formar parte de la gestión de los residuos: quitaría presión al gobierno y a la industria, que así no se verían forzados a buscar una solución precipitada.

Mientras tanto, el Departamento de Energía no debe abandonar el monte Yucca. Muy el contrario: debe valorar de nuevo la conveniencia del sitio bajo diversas circunstancias y modificar el calendario del proyecto según sea necesario. Si la energía nuclear se amplía en todo el mundo hasta un millón de megawatt, se generarán tantos residuos de alto nivel y combustible gastado en el ciclo de combustible de un solo paso como para llenar una instalación del tamaño del depósito del monte Yucca cada tres años y medio. Para la opinión pública, se trata de una razón de peso en contra de la extensión de la energía nuclear, pero este es un problema que puede y debe solucionarse.

LA AMENAZA DE LA PROLIFERACIÓN

Aparte de los programas nacionales de gestión de los residuos, tendrían que continuar los esfuerzos diplomáticos para crear un sistema internacional de países suministradores y países consumidores de combustible, en el que los países suministradores, como EE.UU., Rusia, Francia y el Reino Unido, venderían combustible nuevo a países consumidores, con programas nucleares más pequeños, y se comprometerían a retirarles el combustible gastado. A su vez, los países consumidores renunciarían a la construcción de instalaciones productoras de combustible. Esa transacción coartaría la proliferación de armas nucleares. No son las centrales nucleares las que posibilitan la proliferación, sino las plantas de enriquecimiento y de reprocesado del combustible.

La situación actual, con el programa de enriquecimiento de uranio de Irán, es un ejemplo típico. Al no fabricar combustible los países consumidores, habría que arrendárselo, si se quiere que la energía nuclear se triplique en el mundo: semejante extensión implicaría inevitablemente la existencia de centrales nucleares en algunos países donde otros temerían que se fabricasen armas nucleares.

Si se quiere que este sistema funcione, la producción del combustible debería carecer de interés económico para un programa nuclear restringido. El mundo se divide ya en países suministradores y consumidores. Instituir el reparto de papeles entre productores y solo consumidores formalizaría la situación actual —pero no debe pensarse que sería sencillo—, de modo que se le diese permanencia con nuevos acuerdos que refuerzan las realidades comerciales existentes.

Aunque el régimen propuesto es atractivo por naturaleza para las naciones usuarias, ya que con él conseguirían un suministro fiable de combustible barato sin tener que ocuparse

de los residuos, habría que atender además a otros incentivos. Al fin y al cabo, los estados usuarios aceptarían así limitaciones que irían más allá del tratado de no proliferación nuclear. Por ejemplo, si se instituyese un sistema mundial de permisos negociables de emisión de carbono, a las naciones usuarias que se adhirieran a las reglas del «alquiler» del combustible se les podrían conceder permisos por sus nuevas centrales nucleares.

Irán es hoy el ejemplo más obvio de una nación a la que muchos preferirían ver como consumidora antes que como productora de uranio enriquecido. Pero no constituye un caso único. Otra nación cuyo programa debe abordarse pronto es Brasil, porque allí está en construcción una gran instalación de enriquecimiento que, supuestamente, ha de proporcionar el combustible para los dos reactores nucleares del país. Abordar la situación de Irán y Brasil conforme a unos mismos criterios es necesario para que la energía nuclear pueda expandirse, sin exacerbar el riesgo de una proliferación de armas nucleares.

EL TERAWATT FUTURO

Un terawatt, un millón de megawatt, de energía «libre de carbono» contribuiría significativamente a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono previstas para mediados de siglo. Según el término acuñado por Socolow y Pacala, aportar una o dos de las siete «cúñas» requeridas para la estabilización de las emisiones. Alcanzar un terawatt de energía nuclear hacia el año 2050 presenta una dificultad formidable. Habría que instalar cerca de 2000 megawatt al mes (unas dos centrales grandes) e invertir dos billones de dólares a lo largo de varias décadas. En los próximos diez años habría que empujarse enérgicamente en reducir los costes de las centrales de energía, hacerse cargo de los residuos nucleares e instaurar un ciclo de combustible internacional que no fomentase la proliferación del armamento nuclear. Un factor decisivo será el grado en que se tase el dióxido de carbono emitido por los combustibles fósiles, en el mundo industrializado y en las grandes economías emergentes, como China, India y Brasil.

Pero el económico no es el único factor del que dependerá el uso futuro de la energía nuclear. La aceptación pública dependerá de la seguridad y la solución dada a los residuos nucleares. El futuro de la energía nuclear en los EE.UU. y en buena parte de Europa sigue siendo incierto. Con respecto a la seguridad, es esencial que las regulaciones de la Comisión Nacional de la Energía se hagan cumplir diligentemente.

En el panorama descrito por el estudio del MIT, los Estados Unidos triplican su potencia nuclear civil instalada, hasta los 300.000 megawatt, para que se alcance el terawatt mundial. La suerte de este futuro hipotético quedará echada en la próxima década. Dependerá de en qué medida se ejecuten los «incentivos a primeros» de la Ley de Política Energética de 2005, se empiece a retirar el combustible gastado de sus almacenes provisionales y se adopte una política que de verdad limite las emisiones de dióxido de carbono. ■

PARA SABER MÁS

The Future of Nuclear Power. Stephen Ansolabehere et al., Massachusetts Institute of Technology, 2003.

Making the World Safe for Nuclear Energy. John Deutch, Arnold Kanter, Ernest Moniz y Daniel Poneman en *Survival*, vol. 46, n.º 4, págs. 65-79; diciembre, 2004.

EL ÚLTIMO

¿Es posible frenar o incluso invertir el cambio climático retirando CO₂ de la atmósfera?

Richard Conniff

Fotografías de Liz Tormes



EN LA CENTRAL GEOTÉRMICA de Hellisheiði, en Islandia, unos pozos de inyección introducen en el sustrato rocoso profundo una solución salina junto con dióxido de carbono extraído del aire.

RECURSO





Richard Conniff escribe sobre ciencias naturales. Ha recibido numerosos premios y sus artículos han aparecido en *Time*, *Smithsonian*, *National Geographic* y *The New York Times*, entre otros medios.

P

ARECÍA QUE PARA SALVAR AL MUNDO DEL CAMBIO CLIMÁTICO BASTARÍA con reducir las emisiones de gases con efecto invernadero. Ese objetivo se conseguiría con fuentes de energía limpias, iluminación LED o comiendo menos carne, entre otros métodos. Pero dicha estrategia no ha funcionado. De hecho, las emisiones globales han aumentado. Ahora ni siquiera bastará con reducir a cero las emisiones anuales netas para 2050: los climatólogos sostienen que tendrá que haber también emisiones «negativas»; es decir, deberemos retirar de la atmósfera miles de millones de toneladas de dióxido de carbono cada año.

De acuerdo con un estudio publicado en 2018 en *Environmental Research Letters* y dirigido por Jan C. Minx, del Instituto Mercator de Investigación de los Bienes Comunes y el Cambio Climático Globales, una organización alemana, las emisiones negativas a gran escala se han convertido en una «necesidad biofísica» de la mayor urgencia si queremos limitar el calentamiento a 1,5 grados Celsius. Casi todas las naciones del planeta suscribieron ese objetivo —o, al menos, el de quedar por debajo de los 2 grados— como parte del Acuerdo de París de 2016. Actualmente, el calentamiento es de un grado por encima de los valores preindustriales, pero las temperaturas aumentan 0,2 grados por década. En un informe de octubre de 2018, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático advirtió de que puede que solo queden 12 años para actuar; luego, ya no podremos evitar que el calentamiento rebase los 1,5 grados, el valor considerado por la mayoría de los científicos como el máximo permisible si queremos preservar la vida más o menos como la conocemos.

Permanecer por debajo de ese umbral exige atenerse a un «presupuesto de carbono»; es decir, un volumen máximo de CO₂ que puede añadirse a la atmósfera sin que el calentamiento supere el umbral. Minx y sus coautores explican que, si se mantiene el nivel actual de emisiones (entre 40.000 y 50.000 millones de toneladas anuales), «podrían quedarnos solo cinco años de emisiones de CO₂» antes de que se vuelva imposible cumplir el objetivo de los 1,5 grados. A partir de ahí, cada tonelada adicional exigiría la retirada de una cantidad equivalente. Los investigadores calculan que, para 2100, deberíamos haber extraído de la atmósfera entre 150.000 millones y más de un billón de toneladas de CO₂; entre 2000 y 16.000 millones de toneladas anuales a partir de 2050, con cifras bastante mayores a finales de siglo.

Para conseguirlo, Minx y sus colaboradores apuntan que, a partir de 2030, deberíamos empezar a construir cada año varios centenares de instalaciones de captura y almacenamiento de carbono. En principio las posibilidades van desde grandes máquinas que extraigan CO₂ de la atmósfera hasta centrales de biomasa que capturen el carbono producido y lo entierren a grandes profundidades. O, sin tanta tecnología, replantar bosques o mejorar los suelos para que atrapen más carbono. Sin embargo, la mayoría de los métodos de alta tecnología se encuentran en pañales. Requieren una elevada inversión, con un considerable riesgo de que fracasen. Tienen además importantes efectos secundarios, como la competición por una tierra que, o bien ya está en uso para alimentar a la población, o bien es un hábitat para la vida salvaje.

Con todo, la captura de carbono a gran escala parece constituir la única opción. Cuando, en un estudio publicado en *Nature Climate Change* en 2017, el estadístico de la Universidad de Washington Adrian E. Raftery y sus coautores analizaron las tendencias actuales —sin incluir las técnicas de emisión negativa—, pronosticaron un calentamiento de 3,2 grados para finales de siglo, con un margen que iba de los 2 a los 4,9 grados.

Supongamos entonces que, para este siglo, necesitaremos un billón de toneladas de emisiones negativas (una media de 20.000 millones de toneladas anuales desde 2050 hasta 2100). ¿Qué fracción de ese total podría proporcionar cada método? ¿A qué precio? Dada la competencia entre las distintas técnicas por determinados recursos, como la tierra, ¿cuál sería la combinación óptima de métodos que deberíamos adoptar?

LIMPIAR EL VIENTO

En un campo de lava solidificada cubierta de musgo, a las afueras de Reikiavik, una máquina con el tamaño de un garaje de

EN SÍNTESIS

Para limitar el calentamiento a 1,5 grados, los países tendrán que retirar de la atmósfera un billón de toneladas de CO₂ en el presente siglo.

La clave consistirá en hallar la combinación óptima de métodos de captura de carbono. Las máquinas que extraen CO₂ de la atmósfera podrían retirar hasta 250.000 millones de toneladas de aquí a 2100. La replantación de bosques talados, 180.000 millones de toneladas.

Los costes netos oscilan entre 0 y 300 dólares por tonelada. A menos que se desarrollen grandes mercados de CO₂ capturado, nada apoyaría mejor a estas técnicas que un impuesto sobre el carbono.



UNA MÁQUINA de la compañía Climeworks extrae dióxido de carbono de la atmósfera (1). Dentro de una cúpula cercana, un inyector (2) envía el gas a más de 700 metros de profundidad, donde al reaccionar con el sustrato forma carbonato, visible como vetas blancas en la muestra fotografiada (3).

una plaza hace pasar el aire a través de un filtro químico que extrae el dióxido de carbono. La propulsa el calor residual de una central geotérmica vecina e introduce el dióxido de carbono capturado a más de 700 metros de profundidad, donde reacciona con la roca basáltica y se transforma en un mineral sólido. Climeworks, empresa suiza fundada hace unos años, dice que es la primera planta de almacenamiento y captura directa desde la atmósfera. Secuestra unas modestas 50 toneladas de dióxido de carbono al año.

La captura directa y el almacenamiento del carbono extraído sería la vía más sencilla hacia las emisiones negativas. Una batería de ventiladores y filtros capturaría CO_2 de la atmósfera para enterrarlo después. Esta técnica podría retirar entre 10.000 y 15.000 millones de toneladas de CO_2 al año hacia finales de siglo, cifras que algunos elevan hasta los 35.000 y 40.000 millones de toneladas. Se trata de una previsión tan tentadora que muchos temen que suponga un riesgo moral: ante la esperanza de una salvación tecnológica posterior, muchos podrían concluir que es posible retrasar el abandono de los combustibles fósiles.

No obstante, el examen más completo de los métodos para extraer CO_2 realizado hasta ahora, otro estudio publicado en 2018 en *Environmental Research Letters*, adopta una postura más sobria. Sabine Fuss, del Instituto Mercator, y sus colaboradores analizaron los costes, los efectos secundarios, la sostenibilidad ambiental y otros factores a fin de estimar cuánto carbono podrían secuestrar los siete métodos más importantes. Sitúan el potencial de la captura directa en entre 500 y 5000 millones de toneladas anuales en 2050 —que a finales de siglo se convertirían en 25.000-250.000 millones de toneladas—, con unos costes

de entre 100 y 300 dólares por tonelada. Para hacernos una idea, un coche emite de media 4,6 toneladas anuales.

Algunos sostienen que el coste de la captura desde el aire podría quedar por debajo de los 100 dólares por tonelada. Pero si lo que se tarda en expandir la técnica se parece a los 60 años que requirieron los paneles solares desde su primer uso en satélites en los años cincuenta, la solución «podría llegar demasiado tarde», advierte Minx.

Por otro lado, la captura directa desde la atmósfera consume ingentes cantidades de energía. La extracción anual de un millón de toneladas de dióxido de carbono requeriría una central eléctrica de entre 300 y 500 megavatios, según Jennifer Wilcox, profesora de ingeniería química del Instituto Politécnico de Worcester. Si la central fuera de carbón, generaría más emisiones de las que podría retirar. Si la energía procediera de parques solares o eólicos, se cubriría una gran extensión de tierra que ya estaría solicitada para las labores agrícolas y para la naturaleza. Y, ante el objetivo de 20.000 millones de toneladas anuales, un millón de toneladas es una cantidad irrisoria.

Construir hoy plantas así podría ser esencial, ya que se desarrollarían los conocimientos necesarios para aumentar su escala a lo largo del presente siglo. «Sin embargo, levantar hoy la infraestructura necesaria para extraer 20 millones de toneladas de la atmósfera sería una forma equivocada de invertir el dinero», señala Roger Aines, científico jefe del programa energético del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore. «Consumiría una gran cantidad de energía solar y eólica. Y, si la tuviéramos, lo más inteligente sería aportarla a la red eléctrica y cerrar una central de carbón.» Hoy por hoy, la prioridad sigue siendo prevenir nuevas emisiones.

ABANICO DE PROPUESTAS

El estudio de Fuss no se limita a sumar el potencial de siete métodos para capturar carbono, ya que algunos compiten por los mismos recursos. Por ejemplo, una excesiva reforestación

Continúa en la página 62

Potencial y coste de cada técnica

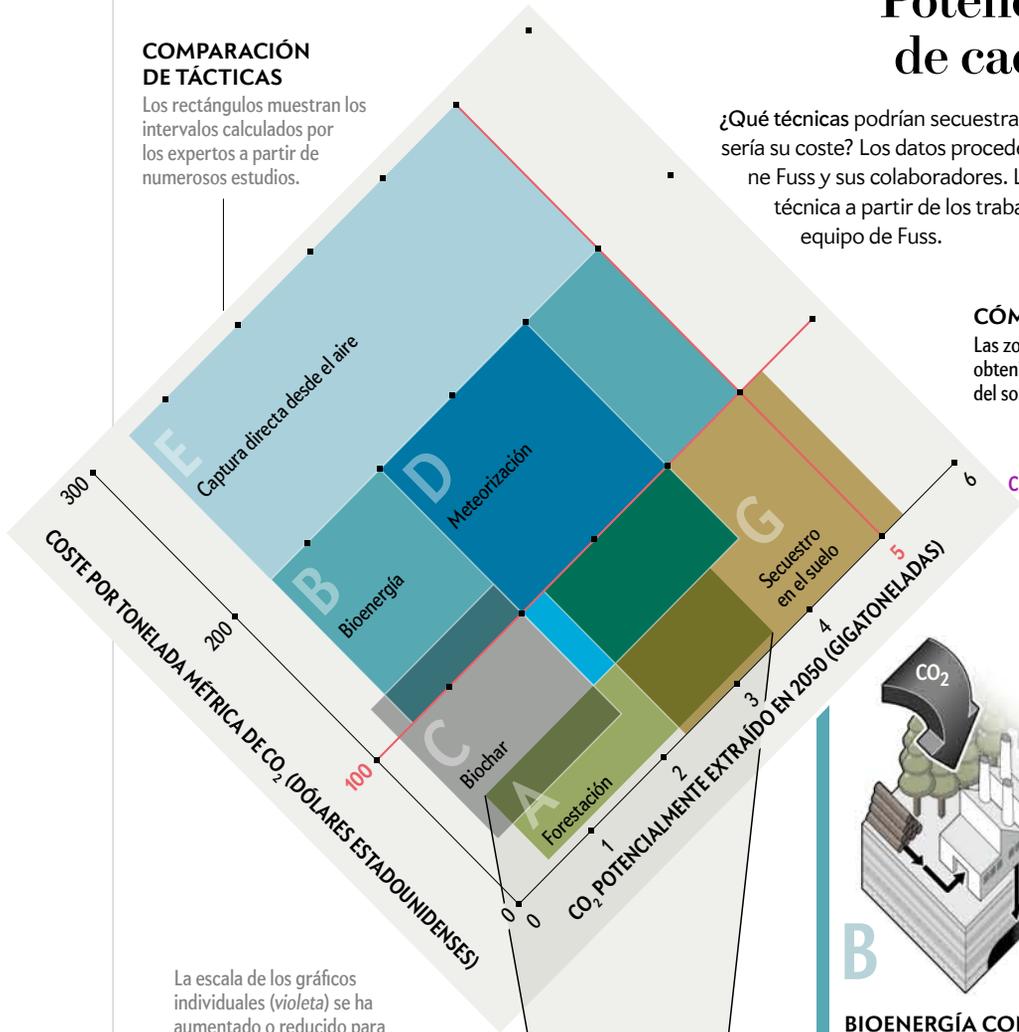
COMPARACIÓN DE TÁCTICAS

Los rectángulos muestran los intervalos calculados por los expertos a partir de numerosos estudios.

¿Qué técnicas podrían secuestrar más dióxido de carbono en 2050? ¿Cuál sería su coste? Los datos proceden de un metanálisis de la economista Sabine Fuss y sus colaboradores. Los gráficos muestran la evaluación de cada técnica a partir de los trabajos analizados y de la opinión experta del equipo de Fuss.

CÓMO LEER LOS GRÁFICOS VIOLETAS

Las zonas coloreadas representan los intervalos de valores obtenidos según distintos estudios. Una mayor intensidad del sombreado indica una mayor coincidencia.

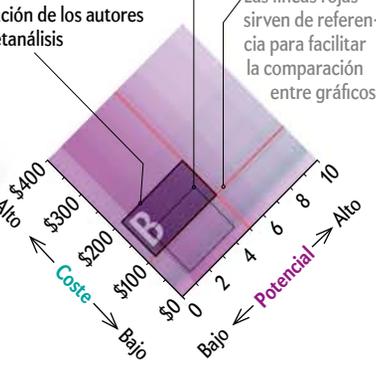
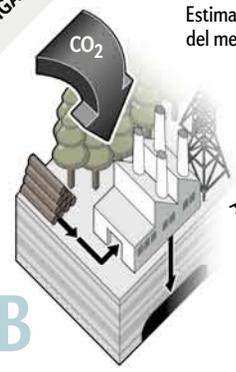


La escala de los gráficos individuales (violeta) se ha aumentado o reducido para facilitar su lectura.



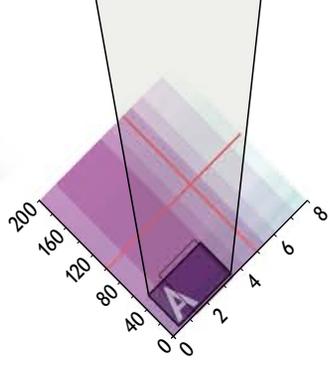
Percentiles 25 y 75 de las estimaciones

Estimación de los autores del metanálisis. Las líneas rojas sirven de referencia para facilitar la comparación entre gráficos.



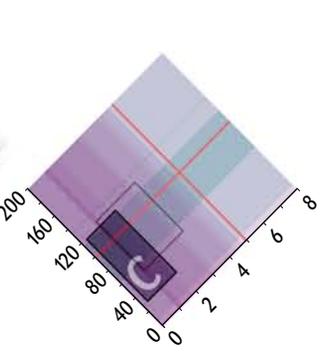
BIOENERGÍA CON CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO

Las plantas, que absorben CO₂, se queman para producir energía o se fermentan para generar combustible. El CO₂ liberado se recupera y se introduce en el subsuelo para almacenarlo de forma permanente. Reporta beneficios, pero podría invadir tierras necesarias para los cultivos.



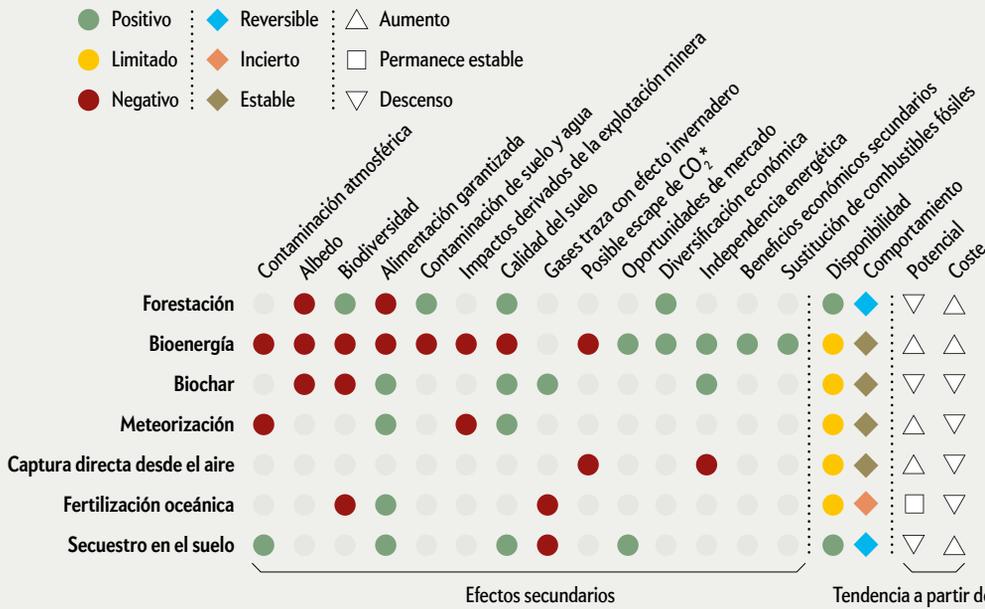
FORESTACIÓN Y REFORESTACIÓN

Al plantarlos para reemplazar los bosques talados o ampliar los existentes, los árboles absorben CO₂ del aire y lo convierten en nueva madera, incluidas las raíces. La técnica exigiría reformar la gestión y los mercados de la madera.



BIOCHAR

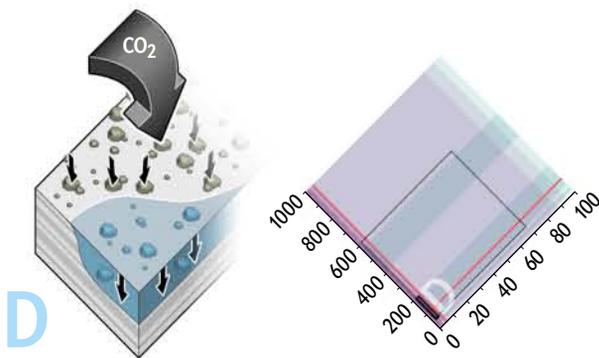
Cultivos, estiércol o residuos orgánicos se calientan en ausencia de oxígeno para generar biocombustible y biochar (un residuo con alto contenido en carbono, similar al carbón vegetal). Se los rocía en los campos para mejorar el suelo agrícola y fijar más carbono en este. Sería muy difícil producirlos a gran escala con un consumo energético mínimo.



PROS Y CONTRAS

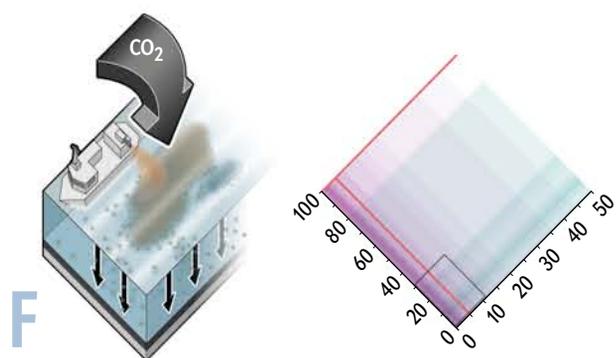
Las técnicas de captura de carbono para 2050 (filas) tendrán efectos secundarios positivos o negativos (círculos). «Disponibilidad» indica lo a punto que podría estar un método en un momento determinado. «Comportamiento» muestra el riesgo de que el CO₂ almacenado escape de nuevo a la atmósfera: «reversible» indica que es alto; «estable», bajo (diamantes). En el extremo derecho (triángulos) se muestra si, a partir de 2050, aumentarán o disminuirán el potencial de secuestrar carbono y el coste en función de factores como lo limitado del terreno. Los efectos se estiman según la valoración predominante en los artículos publicados (si el número de estos es escaso, la casilla correspondiente queda en blanco).

* «Possible escape de CO₂»: de su almacenamiento en el subsuelo



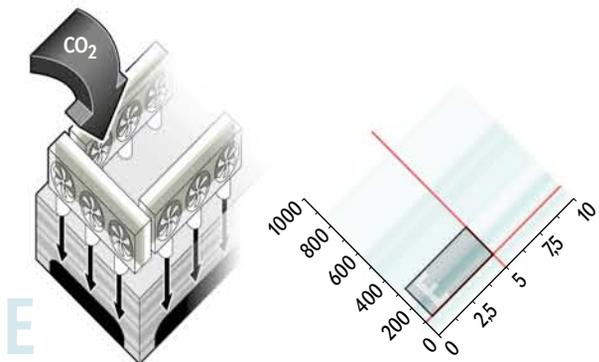
METEORIZACIÓN AMPLIFICADA

La roca se tritura hasta obtener polvo. Al aplicarlo en los campos, fija el CO₂ atmosférico y fertiliza el suelo. En el mar, reacciona con el agua y convierte el CO₂ en carbonatos que se depositan en el fondo. Lo difícil es moler y transportar la roca de forma económica.



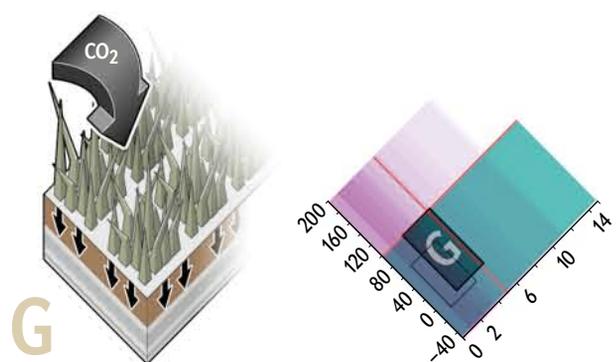
FERTILIZACIÓN OCEÁNICA

Consiste en espolvorear sobre el mar limaduras de hierro. Estas favorecen el crecimiento del plancton, que absorbe CO₂ y lo convierte en azúcares o material celular. Al morir, se hunde. Los beneficios serían pasajeros y alterar los ecosistemas resultaría arriesgado, razón por la que no aparece en el esquema conjunto (página anterior).



CAPTURA DIRECTA DESDE EL AIRE

Unas máquinas extraen aire ambiental, separan químicamente el CO₂ y lo inyectan en el subsuelo para almacenarlo de forma permanente. Se prevén costes elevados, pero el desarrollo técnico podría reducirlos. (Los datos referentes al carbono potencialmente retirado no se hallaban disponibles.)



SECUESTRO DE CARBONO EN EL SUELO

Las plantas herbáceas y los cultivos incorporan en sus raíces el CO₂ que absorben, lo que fija carbono en el suelo. La gestión del suelo incrementaría el secuestro de carbono y el rendimiento de las cosechas. El potencial a largo plazo sería limitado, ya que los suelos solo pueden retener una determinada cantidad de carbono.

Viene de la página 59

ocuparía terrenos necesarios para el cultivo del combustible empleado en las centrales de bioenergía. Y la excesiva producción de bioenergía competiría con la captura directa por el secuestro del carbono en el subsuelo.

Según Pete Smith, profesor de ciencias del suelo y cambio global de la Universidad de Aberdeen, una forma de comenzar consistiría en ampliar los métodos ya conocidos: «Sabemos plantar árboles. Sabemos recuperar turberas elevando el nivel freático [con lo que capturan el dióxido de carbono en lugar de emitirlo]. Sabemos aumentar el contenido en carbono del suelo. Incentivar ese tipo de acciones es [relativamente] sencillo y se podría hacer de modo inmediato. Adelantaríamos parte del camino», apunta.

Los bosques tropicales del planeta se han convertido, a medida que se talan y se queman o a medida que las áreas devastadas se descomponen, en fuentes de CO₂ en vez de ser sus sumideros. Transformar de nuevo los bosques en territorios de emisiones negativas requeriría, en primer lugar, importantes reformas en el mercado internacional de madera, muy influido por el comercio ilegal. Los lugares más obvios para la reforestación son los terrenos que se talaron con fines agrícolas o de pastoreo pero que más tarde se abandonaron por su improductividad. La restauración de cinco millones de kilómetros cuadrados secuestraría 3700 millones de toneladas de CO₂ al año si se dispusiera de la financiación adecuada, según un estudio publicado en 2015 en *Nature Climate Change* y dirigido por Richard Houghton, del Centro de Investigación de Woods Hole.

Reconvertir todos los pastizales en los antiguos bosques que una vez fueron podría generar hasta 10.000 millones de toneladas de emisiones negativas al año, según Bronson Griscom, director de ciencias de carbono forestal de la organización internacional The Nature Conservancy y autor principal de un estudio sobre las «soluciones climáticas naturales» publicado en la revista *PNAS*. Ello supondría una considerable fracción de la extracción total de CO₂ que se necesita anualmente. Sin embargo, requeriría un cambio global hacia un menor consumo de carne, una tendencia opuesta a la actual.

Fuss y sus coautores pronostican un potencial más modesto. Los árboles viven y mueren. Por tanto, el carbono que acumulan hoy lo liberarán de nuevo a lo largo del siglo actual o del siguiente. Probablemente, conforme los bosques maduren y crezcan más despacio, la cantidad de dióxido de carbono que secuestren también disminuirá. Los incendios forestales, la deforestación y el cambio climático elevan los riesgos. Aun así, la expansión de los bosques podría suponer un recurso temporal de la mayor importancia mientras se expanden la captura directa y otras técnicas. Fuss sitúa su potencial entre 500 y 3600 millones de toneladas de CO₂ retirado anualmente hacia 2050, lo que supondría entre 25.000 y 180.000 millones de toneladas para el objetivo de un billón de toneladas en este siglo, con un coste de entre 5 y 50 dólares por tonelada.

No obstante, una gestión más eficiente podría elevar los beneficios. Griscom señala que, en el sureste de EE.UU., se han talado deliberadamente pinos taeda varios años antes de que alcanzaran sus condiciones óptimas. Permitir vender créditos de carbono para financiar los años adicionales de crecimiento ayudaría a retrasar la tala hasta que los árboles alcanzaran la edad óptima; así se obtendría más madera y se almacenaría más carbono.

Cultivar plantas que fijen nitrógeno en los pastizales y adoptar en ellos sistemas de rotación más inteligentes aumentaría



ABONO DE BIOCHAR obtenido a partir del calentamiento de residuos de pollo y trozos de madera. De otro modo, dichas sustancias habrían liberado dióxido de carbono al descomponerse.

tanto la productividad del suelo como su capacidad para almacenar carbono. Según las prudentes estimaciones de Fuss, ello permitiría el secuestro de hasta 5300 millones de toneladas al año (265.000 millones a lo largo del siglo) con unos costes de entre 0 y 100 dólares por tonelada.

Y eso se sumaría al biochar, o «biocarbón». En esta forma de retirada del carbono, un horno calienta biomasa en ausencia de oxígeno y la convierte en una forma de carbón vegetal. El proceso también genera subproductos útiles, como el bioóil o el gas sintético. Cuando se aplica el carbón vegetal en los campos de cultivo, fija el carbono en el suelo y puede mejorar el rendimiento de las cosechas. Sin embargo, todavía nadie ha intentado emplear biochar a gran escala. Fuss y sus coautores lo consideran un método factible que podría retirar entre 300 y 2000 millones de toneladas de CO₂ al año (un total de entre 15.000 y 100.000 millones de toneladas en todo el siglo) con un coste de entre 90 y 120 dólares por tonelada.

Otro método basado en la tierra es la llamada bioenergía con captura y almacenamiento de carbono. Las estrategias iniciales de muchos países para cumplir sus compromisos de París dependen de esta técnica, aunque es muy polémica. En una central eléctrica se queman madera, residuos agrícolas u otro tipo de biomasa, como el *Panicum virgatum* o pasto varilla, una planta forrajera. Estos recursos retiran dióxido de carbono de la atmósfera a medida que crecen. Cuando el carbono se libera de nuevo al quemarlos, la central eléctrica lo recaptura en la chimenea y lo inyecta en el subsuelo para almacenarlo de modo permanente en formaciones geológicas profundas. Sin embargo, la reforestación destinada a la producción de biocombustible, aplicada a la escala sugerida por algunos de sus defensores, acapararía buena parte de las tierras cultivables del planeta, lo que pondría en riesgo la producción de alimentos y la conservación de la naturaleza. Y también perjudicaría a la retirada del dióxido de carbono por otros medios, como la reforestación o el secuestro de carbono en el suelo. La captura de las emisiones en las chimeneas también reduce drásticamente la eficiencia de las centrales eléctricas, al menos con las tecnologías actuales. Por tanto, Fuss sitúa el rendimiento sostenible de la bioenergía con captura y almacenamiento en tan solo 2000 millones de toneladas anuales, muy por debajo de lo previsto por otros, y con un coste que oscila entre 100 y 200 dólares por tonelada. Según sus estimaciones, el proceso aportaría 100.000 millones de toneladas de emisiones negativas hacia 2100.

Quedan por considerar otros dos métodos de captura de carbono. La meteorización amplificada aprovecha un proceso natural: el dióxido de carbono atmosférico se transforma en carbonato al exponerse a determinados tipos de roca triturada. El objetivo consiste en acelerar ese proceso natural, pero hay que hallar un método barato de pulverizar las rocas adecuadas. Fuss sitúa su potencial entre 2000 y 4000 millones de toneladas al año, con un coste de entre 50 y 200 dólares por tonelada. Por último, su equipo concluye que la fertilización oceánica, consistente en rociar el océano con hierro y otros nutrientes para estimular la producción de algas y otros tipos de plancton que absorben dióxido de carbono, sería un recurso demasiado ineficiente y efímero como para justificar sus consecuencias negativas en los ecosistemas. «Se trata de una estrategia inviable para obtener emisiones negativas», afirman.

BENEFICIOS EN LUGAR DE COSTES

¿Qué conclusión sacamos de estas cuentas? Los intervalos del estudio dirigido por Fuss van desde unos meros 150.000 millones de toneladas retiradas hasta algo más de un billón para 2100. Parecería que el último de estos números resuelve el problema, pero hay conflictos entre los métodos. Como dice Fuss, hay que aprovechar los solapamientos beneficiosos. Por ejemplo, la meteorización amplificada podría aplicarse en los mismos terrenos donde se cultive la biomasa para la generación de bioenergía con captura y almacenamiento de carbono.

Todos estos métodos requieren enormes inversiones en investigación y desarrollo. Sin embargo, los Gobiernos se han mostrado reacios a costear las tecnologías de emisiones negativas debido a una resistencia ideológica a «escoger a los ganadores» y a que algunas inversiones pasadas derivaron en fracasos notorios. Por ejemplo, el Departamento de Energía de EE.UU. ha gastado enormes sumas de dinero en proyectos de captura de carbono para la generación de energía a partir de «carbón limpio». La compañía eléctrica Southern Company abandonó su última tentativa en 2017 y reconvirtió la central de carbón limpio de Kemper County, en Misisipi, en una de gas natural tras haber gastado 7500 millones de dólares.

La aplicación de un impuesto sobre el carbono evitaría escoger ganadores. Supondría un incentivo económico tanto para reducir las emisiones actuales como para, más adelante, retirar las del pasado. Reino Unido introdujo un impuesto de ese tipo, actualmente de unos 25 dólares por tonelada, que aplicó sobre todo a las centrales eléctricas que empleaban combustibles fósiles, y las emisiones por el carbón se redujeron a la mitad entre 2015 y 2016. La mayoría de los Gobiernos, sin embargo, consideran el impuesto como una medida demasiado drástica para una economía basada en los combustibles fósiles.

Salvo contadas excepciones, las grandes empresas también se han mostrado reacios a invertir en técnicas de extracción de CO₂, puesto que, hasta hace poco, no les veían mercado. Sin embargo, la situación podría estar cambiando gracias a un paquete de incentivos fiscales, sorprendentemente bipartidista, aprobado por el Congreso de EE.UU. a comienzos de 2018. La llamada legislación 45Q amplía los créditos fiscales que pueden solicitar las compañías en los próximos 12 años, no solo para capturar el dióxido de carbono y almacenarlo en el subsuelo (a 50 dólares por tonelada en créditos fiscales), sino también para darle al CO₂ distintos usos.

Su empleo en la «extracción de petróleo ampliada» es el más controvertido. Una empresa petrolera compra dióxido de carbono, lo transporta por medio de un gasoducto y lo inyecta en pozos

vacíos para forzar la salida de un crudo que ya no puede extraerse con los métodos tradicionales. La adopción de una solución climática que implique la producción de *más* combustibles fósiles puede sonar orwelliana. Sin embargo, parece que la extracción de petróleo ampliada reduce las emisiones actuales, ya que el dióxido de carbono capturado, normalmente procedente del gas natural o las refinerías de etanol, permanece almacenado en el subsuelo. Algunos ecologistas, como Kurt Waltzer, de la iniciativa Aire Limpio, argumentan que transformar la captura de carbono en una tecnología energética, antes que en una tecnología de emisiones, supone el primer paso hacia una comercialización generalizada de la retirada de dióxido de carbono. El CO₂ recapturado se convertiría en un producto que se compra o se vende en lugar de en uno cuyo coste hay que afrontar. Ahí podría radicar la clave de las emisiones negativas.

HORA DE EMPEZAR

¿Nos permitiría un abanico de métodos de captura de carbono, impuestos y mercados alcanzar el objetivo del billón de toneladas hacia 2100? El más que caluroso verano de 2018 puede haber sido un punto de inflexión. En un artículo publicado en la revista *PNAS*, un grupo de climatólogos no se anduvo por las ramas. El autor principal, Hans Joachim Schellnhuber, director emérito del Instituto de Investigación sobre el Impacto del Clima, en Potsdam, se lo explicó así a los periodistas: los efectos en cascada podrían conducir a un mundo capaz de mantener a tan solo mil millones de seres humanos, en vez de a uno con 7500 millones.

A algunos dirigentes políticos el cambio climático les sigue pareciendo incierto pese las abrumadoras pruebas de que constituye nuestro aciago presente y nuestro aún más aciago futuro. Lo desconcertante de las técnicas de emisiones negativas es que hasta los propios científicos consideran inciertos muchos de sus aspectos.

«Puede que la cuestión se haya centrado demasiado en la escala final», opina Brendan Jordan, del Instituto de las Grandes Llanuras, en Minneapolis. «Me temo que nos paraliza, y no nos podemos permitir ninguna parálisis.» Es decir, deberíamos empezar ya con las emisiones negativas a pesar de las incertidumbres, dado que estas resultan triviales comparadas con un mundo donde se detiene el juego de sillas del cambio climático y faltan asientos para 6500 millones de personas. ■

PARA SABER MÁS

Natural climate solutions. Bronson W. Griscom et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 114, n.º 44, págs. 11.645-11.650; 31 de octubre de 2017.

Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. Sabine Fuss et al. en *Environmental Research Letters*, vol. 13, n.º 6, artículo n.º 063002; junio de 2018.

Technological carbon removal in the United States. James Mulligan et al. Instituto de Recursos Mundiales; septiembre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Una solución integral al carbono. Steven L. Bryant en *lyC*, enero de 2014.

La falacia de la captura de carbono. David Biello en *lyC*, marzo de 2016.

Secuestro de carbono en los suelos forestales. Pere Rovira en *lyC*, marzo de 2017.



Secuestro de carbono en los suelos forestales

La reforestación de los terrenos baldíos
contribuye a retirar carbono de la atmósfera.
Pero sus efectos solo se notan a largo plazo,
y quizá no sea siempre la mejor opción

Pere Rovira



Pere Rovira es investigador del Centro Tecnológico Forestal de Cataluña, en Solsona. Sus estudios se centran en la transformación que experimenta la materia orgánica edáfica como consecuencia del cambio climático y los cambios de uso del suelo.



EL CAMBIO CLIMÁTICO ES, EN POCAS PALABRAS, LA CONSECUENCIA de un desequilibrio en el ciclo del carbono. Uno de sus componentes, la atmósfera, está recibiendo desde hace aproximadamente un siglo y medio aportes de carbono muy superiores a los que recibiría de forma natural. Tales aportes se derivan en general de las actividades humanas y, muy en particular, del uso de carbono fósil. Su combustión en motores y centrales térmicas genera grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂), un gas que se acumula en la atmósfera y tiene efecto invernadero, lo que da lugar al calentamiento del planeta.

En el medio terrestre, el carbono se acumula principalmente en los suelos. Este elemento se encuentra allí en dos formas: la orgánica y la inorgánica. El carbono orgánico corresponde a la materia orgánica procedente de los restos vegetales muertos (hojarasca, raíces, etcétera) que se incorporan al suelo para sufrir un proceso de descomposición y humificación (transformación en humus). El inorgánico forma parte de los carbonatos y los fragmentos de roca caliza del suelo y es muy estable en su conjunto: sus cambios ocurren a escalas de tiempo de miles o incluso millones de años. El carbono orgánico, en cambio, es mucho más dinámico: puede aumentar o disminuir en escalas de tiempo de décadas o siglos, y, acaso lo más importante para nosotros, podemos gestionarlo. Por ello, la mayor parte de los estudios acerca del ciclo del carbono en los suelos se centran en el carbono orgánico, y cuando se refieren a las reservas de carbono edáfico, sin más, se refieren a él. En el presente artículo seguiremos también este criterio.

La cantidad de carbono que albergan los suelos suele ser superior a la que retiene la vegetación y, en comparación, también más estable. Esta reserva de carbono edáfico depende, entre otros factores, del tipo de vegetación. Favorecer la expansión de comunidades vegetales que acumulan más carbono edáfico es, por tanto, una forma obvia de secuestrar carbono en los suelos. Los bosques suelen asociarse con suelos ricos en materia orgánica (y por tanto, en carbono), mientras que las zonas cultivadas suelen asociarse con suelos pobres en carbono. Los cultivos son cruciales por razones obvias: alimentan a la población humana. Suprimirlos, sin más, es sencillamente impensable. Pero

cuando se abandonan —por ejemplo, debido a una rentabilidad ínfima—, se plantea la cuestión de qué hacer con los terrenos que quedan disponibles. A menudo se ha propuesto la idea de reforestarlos para favorecer el secuestro de carbono atmosférico en el suelo y mitigar así los efectos del cambio climático.

¿Cuál es, en realidad, la eficacia de tal práctica? La respuesta a esta simple pregunta es, de hecho, compleja. El objeto de este artículo es aportar información a este debate. Para ello analizamos los diversos factores que influyen en la retención de carbono orgánico en el suelo. Basándonos en la información disponible, examinamos cuáles serían las consecuencias de la reforestación en los suelos de España, teniendo en cuenta la variedad de regiones climáticas y tipos de vegetación que el país alberga.

EL SUELO, UN FACTOR CLAVE

Antes de entrar a discutir el tema de la reforestación, debemos comentar la función esencial que ejercen los suelos como almacén de carbono. En varias ocasiones se ha intentado estimar la reserva mundial de carbono en los suelos. El resultado varía ligeramente de un autor a otro, pero, en conjunto, gira en torno a los 1600 petagramos (1 petagramo = 10¹⁵ gramos = 1.000.000.000 toneladas). Suele mencionarse que el carbono acumulado en los suelos del mundo es, en cifras redondas, el doble del almacenado en la vegetación. Ello da una idea de la relevancia de los suelos en cuanto a sumideros de carbono. Sin embargo, todavía es una cantidad pequeña, si la comparamos con la que debió de almacenar antes de la revolución neolítica.

La roturación a gran escala de bosques, prados o matorrales para su conversión en cultivos ha provocado a lo largo de la historia pérdidas enormes de carbono del suelo, el cual se ha transferido a la atmósfera. Se llevó a cabo en tiempos históricos en Oriente Próximo, China, Europa, los valles del Ganges y del Indo, Mesoamérica y, en general, en cualquier lugar en que se diera el paso de deforestar de forma masiva la tierra disponible para dedicarla a la agricultura. Y sigue realizándose hoy en zonas como la Amazonia, Indonesia, África y dondequiera que las necesidades de suelo para el cultivo vayan en este sentido. Solo que hoy tenemos edafólogos para estudiar este fenómeno y cuantificarlo. Se han realizado muchos estudios acerca de la pérdida de carbono edáfico como consecuencia de la conversión

EN SÍNTESIS

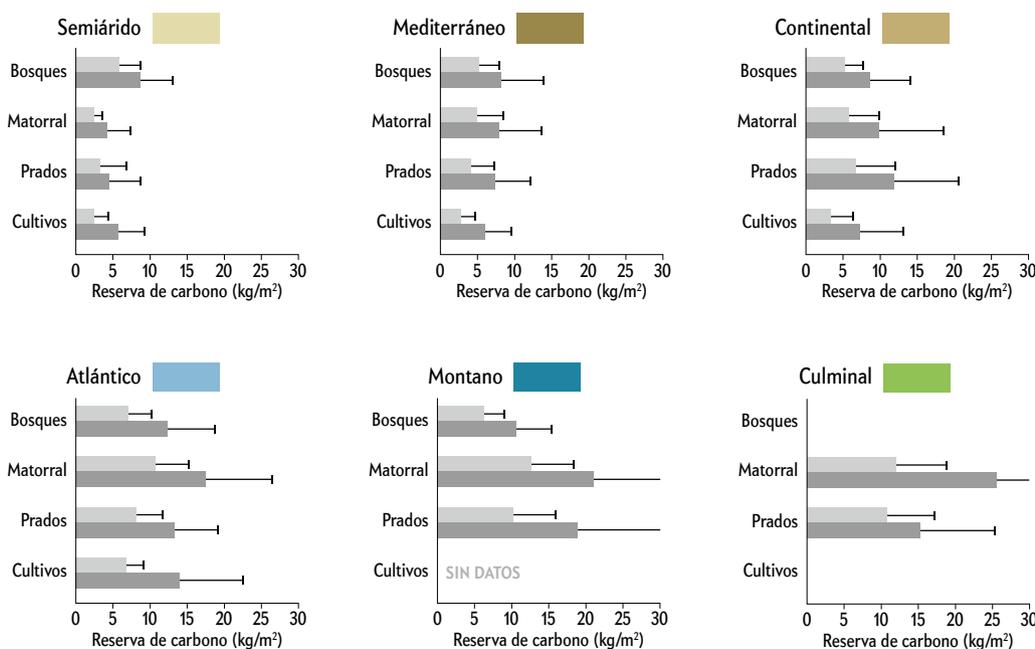
Aumentar el contenido de los suelos en carbono orgánico, procedente sobre todo de la descomposición de los residuos vegetales, permitiría atenuar el exceso de CO₂ atmosférico, responsable del cambio climático.

De cara a conseguir ese objetivo, reforestar terrenos baldíos o improductivos parece a primera vista una política adecuada. Pero en España, especialmente en las zonas húmedas, quizá no sea siempre la opción más efectiva. Después de una plantación, pueden necesitarse varias décadas para que se produzca una ganancia neta de carbono, y aún más para que este quede retenido en el suelo de forma estable.

El mantillo de hojarasca del suelo representa un secuestro neto de carbono y tarda menos en formarse tras la reforestación. Sin embargo, es frágil y puede perderse con facilidad.

¿Cuánto carbono almacenan nuestros suelos?

En España, la reserva de carbono de los suelos es, en promedio, de unos 8 kilogramos por metro cuadrado. Las capas más superficiales, hasta los 25 centímetros de profundidad, almacenan proporcionalmente más carbono que el resto del suelo, hasta los 100 centímetros. Los valores varían mucho de un lugar a otro (gráficas*). Dos factores resultan determinantes en esta variabilidad: el tipo de vegetación y la zona climática. Los suelos de las zonas secas (semiárida y mediterránea) suelen ser los más pobres en carbono. Los de zonas húmedas son ricos; pero en ellas los suelos forestales almacenan más carbono, en promedio, que los suelos bajo prado o matorral. También llama la atención que los suelos agrícolas no siempre son los más pobres.



*No se incluye el carbono acumulado en el mantillo de hojarasca. Las barras gruesas son valores promedio; las finas, desviaciones estándar. Los seis grandes tipos climáticos corresponden a la clasificación de Allué-Andrade, ligeramente modificada.

de zonas forestadas en terrenos agrícolas; la pérdida suele ser del orden del 40 por ciento de la reserva de carbono original, pero puede superar el 50 por ciento.

Estas pérdidas nos indican que la reserva de carbono edáfico es frágil. Como veremos a continuación, hay que esperar que una parte de ella se pierda debido al cambio climático. Ello contribuirá al incremento de CO₂ atmosférico, empeorando aún más la situación. Frente a esta perspectiva, se impone en todo el mundo la necesidad de trabajar activamente en el sentido contrario: aumentar la reserva de carbono de los suelos.

Una proporción relevante del carbono de la atmósfera estuvo una vez en el suelo. Y podría volver a él, al menos en parte, si

gestionamos el suelo adecuadamente. De hecho, debería volver a él; entre otras razones porque, dejando de lado la cuestión del cambio climático, la pérdida alarmante de fertilidad de los suelos agrícolas a escala mundial se debe, en gran parte, a la disminución generalizada de su contenido en materia orgánica [véase «¿Podremos salvar los suelos?», por Ramón Vallejo; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2015].

La consciencia sobre tales problemas subyace a las políticas que se proponen de favorecer el secuestro de carbono en el suelo. En el caso de los suelos agrícolas, hay un repertorio de prácticas que darían este resultado, como la incorporación sistemática de enmiendas y abonos orgánicos, estiércol, compost o residuos

de cosechas. También es necesario cambiar la mentalidad de muchos agricultores, que aplican de modo automático algunos métodos, cuanto menos, dudosos. Así, en algunos tipos de cultivo (viña, olivo), la obsesión por despojar el suelo de cualquier cubierta que no sea la de la propia planta cultivada tiene efectos perversos sobre su contenido de carbono, porque elimina una fuente de alimentación importante (las raíces de tales plantas) y deja el suelo desnudo y expuesto a la radiación solar.

El Ministerio de Agricultura, Agroalimentación y Bosques de Francia ha lanzado recientemente un objetivo para mitigar el cambio climático en las próximas décadas: el reto del 4 por mil. Presentado en la conferencia *Our common future under climate change* («Nuestro futuro común bajo el cambio climático»), celebrada en julio de 2015 en París, con él se pretende aumentar la reserva mundial de carbono en los suelos un cuatro por mil, o un 0,4 por ciento, cada año. Parece un objetivo muy modesto. Pero si aceptamos la estimación antes mencionada de 1600 petagramos de carbono edáfico en todo el mundo, incrementar esta cantidad un cuatro por mil significa secuestrar en el suelo unos 6,4 petagramos de carbono, una cifra que corresponde aproximadamente a las emisiones anuales de carbono a la atmósfera. Por tanto, esta iniciativa es, en realidad, ambiciosa.

Queda por ver, lógicamente, si es posible.

LOS SUELOS DE ESPAÑA

Para saber si los suelos de nuestro país pueden contribuir a retirar carbono de la atmósfera, debemos conocer primero cuál es su contenido actual de carbono. El punto de partida para estimar la reserva de carbono a escala local, regional o estatal consiste en disponer de una buena base de perfiles. En edafología, un perfil es un corte vertical del suelo realizado in situ, generalmente con una pala, hasta llegar al sustrato rocoso sobre el que se asienta el suelo. A continuación se describen las características morfológicas de las distintas capas observadas (llamadas «horizontes»), de las que se toman muestras para analizar en el laboratorio. Por supuesto, el dato crucial para nosotros es el contenido de carbono de las distintas capas.

Varios estudios han cuantificado el carbono almacenado en los suelos de España. Juan C. Rodríguez Murillo, del Museo Nacional de Ciencias Naturales, en Madrid, publicó en 2001 la primera estimación de la reserva total de carbono en los suelos de España: 3,7 petagramos de carbono, con un contenido medio de 7,59 kilogramos de carbono por metro cuadrado. Estimaciones posteriores han dado resultados parecidos, por lo que el valor real no debe andar muy lejos de esa cifra. Así, Enrique Doblas Miranda, del Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales, en Barcelona, y sus colaboradores calculaban en 2013 que los suelos no agrícolas de España (bosques, prados, matorrales) acumulan 2,54 petagramos de carbono hasta un metro de profundidad, lo que corresponde a una media de unos 8,7 kilogramos de carbono por metro cuadrado. Teniendo en cuenta que ese estudio descartaba los suelos agrícolas, que suelen ser los más pobres en carbono, ambos trabajos son muy coincidentes. Un estudio publicado en 2016 por José A. Rodríguez-Martín, del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria en Madrid, y sus colaboradores, ha dado un resultado inferior, de unos 2,8 petagramos. La diferencia resulta menos relevante de lo que podría parecer: en el último estudio solo se consideraron los 30 centímetros más superficiales del suelo, mientras que en los anteriores se valoraba el perfil entero o hasta un metro de profundidad, límite típico para muchos de estos trabajos.

Con el fin de profundizar en el efecto del uso del suelo sobre la reserva de carbono en los suelos de España, el autor de este artículo ha recopilado y examinado los datos de estudios publicados en revistas españolas a lo largo de las últimas décadas, así como de trabajos inéditos, informes encargados por administraciones variadas, estudios puntuales de alcance regional o provincial, etcétera. Los datos que se presentan a continuación corresponden a la España peninsular y las islas Baleares (las Canarias, con ecosistemas muy distintos, no se han incluido) y, salvo que se mencione lo contrario, los valores se refieren a kilogramos de carbono por metro cuadrado, hasta un metro de profundidad.

La información recopilada depara algunas sorpresas. Por ejemplo, el hecho de que los suelos forestales no son particularmente ricos en carbono, con 9,75 kilogramos por metro cuadrado en promedio. La reserva de carbono bajo matorrales y prados es superior, de 11,52 y 13,50 kilogramos, respectivamente. Hay que recalcar la consistencia de este resultado, que se mantiene para todos los tipos de bosque considerados (planifolios, coníferas, bosques mixtos...).

Los datos pueden presentarse también desde otra perspectiva: el clima. Consideremos las seis grandes áreas del territorio español basadas en la clasificación fitoclimática de Allué-Andrade. Cada una de estas áreas corresponde a un tipo climático bien delimitado: semiárido, mediterráneo litoral (en lo sucesivo, mediterráneo a secas), mediterráneo continental (en lo sucesivo, continental a secas), atlántico, montano (zonas ubicadas en laderas de grandes macizos montañosos) y culminal (zonas culminales de alta montaña; ocupan un porcentaje ínfimo del territorio). Al explorar los datos de carbono edáfico en estas grandes áreas observamos que la reserva de carbono aumenta al pasar de las zonas más áridas a las más húmedas, desde los 5,40 kilogramos por metro cuadrado en la zona semiárida hasta los 16,23 en las zonas culminales. Si bien, como cabía esperar, la variabilidad de los datos dentro de cada área es enorme.

Teniendo en cuenta que la reserva de carbono resulta inferior en las zonas secas que en las húmedas, es lógico pensar que si el clima se vuelve más árido (con un aumento de las temperaturas y una disminución de las precipitaciones) se producirá un descenso en la cantidad de carbono almacenado. Uno de los efectos esperados del cambio climático es, precisamente, una pérdida generalizada de carbono en los suelos de España. Para mitigar ese efecto podemos aplicar prácticas que den lugar a un aumento de la reserva de carbono, sin perder de vista que, por así decirlo, el cambio climático empuja en sentido opuesto.

Si combinamos tipo de vegetación y zona climática, observamos que las zonas más secas (semiárida y mediterránea) son las únicas en las que los suelos forestales son los más ricos en carbono; en la España húmeda estos ocupan el segundo o el tercer lugar. Que los bosques se sitúen en muchos casos por detrás de los prados, en lo que a reserva de carbono edáfico se refiere, era algo esperable: después de todo, los suelos pratenses tienen la reputación de ser los más ricos en carbono, a escala mundial. Más relevante es el hecho de que en algunas zonas, por ejemplo la atlántica, las mayores reservas de carbono edáfico se produzcan bajo matorral. Este es un resultado incómodo, porque el matorral es visto a menudo como un tipo de vegetación improductivo, en comparación con los demás tipos de vegetación, más útiles económicamente.

Otro resultado notable es que, si contabilizamos la reserva de carbono hasta un metro de profundidad, observamos que los suelos agrícolas no siempre son los más pobres. De hecho,

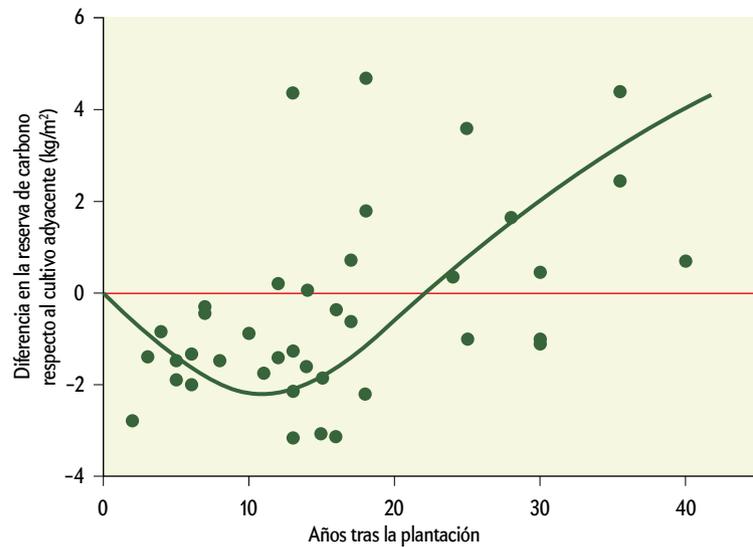
LA REFORESTACIÓN de una zona previamente cultivada conlleva cambios en el contenido de carbono del suelo, aunque estos no siempre resultan positivos. En parcelas reforestadas con *Pinus radiata*, cerca de Lugo (fotografía), durante los primeros años se produce una pérdida neta de carbono. Deben transcurrir dos decenios o más para que el balance resulte positivo. (Los datos corresponden a la diferencia en el contenido de carbono en los primeros 30 centímetros de suelo mineral entre pares de parcelas, una reforestada y la otra mantenida en cultivo.)

en algunas zonas estos suelos contienen más carbono que los ocupados por bosques. Este resultado puede sorprender al lego en edafología, pero no es del todo inesperado: los suelos agrícolas son los mejores, por la sencilla razón de que desde tiempo inmemorial se han escogido para cultivar los terrenos más profundos, menos pedregosos y con texturas más favorables al crecimiento de las plantas; en tanto que los usos menos productivos (matorrales, bosques) han quedado relegados a zonas con suelos poco profundos, fisurales o demasiado pedregosos. La capacidad de acumulación de carbono de un suelo está limitada por su profundidad (cuanto más profundo, mayor capacidad) y por su pedregosidad (a mayor pedregosidad, menor volumen útil y menor capacidad). Y los suelos agrícolas suelen ser los más profundos y los menos pedregosos. Así, aun cuando los suelos agrícolas suelen tener la concentración de carbono más baja, en ellos la reserva total de carbono puede ser notable.

Hay otro factor de extrema importancia que debe tenerse en cuenta: la distribución del carbono en profundidad. Al pasear por cualquier bosque, la observación de un mantillo de hojarasca grueso y esponjoso puede sugerir que bajo el arbolado yace una cantidad enorme de materia orgánica. Y no es así, o no necesariamente. El contenido de carbono orgánico disminuye con rapidez en profundidad: este descenso es muy acusado en los suelos forestales, lo es menos bajo otros tipos de vegetación, como prados o matorrales, y todavía menos en los suelos agrícolas, donde el contenido de carbono resulta bastante homogéneo a lo largo del perfil. La consecuencia es que, mientras que las capas superficiales de los suelos forestales acumulan mucho más carbono que las de los suelos agrícolas, ello no siempre puede extrapolarse al perfil entero.

Sin embargo, si nos centramos en lo que sucede en los primeros 25 centímetros, las cosas parecen volver a su lugar. El efecto distorsionante de la diferente profundidad del suelo desaparece, y el efecto de cada tipo de vegetación se muestra con mayor claridad. Los suelos que almacenan menos carbono en los primeros 25 centímetros son los agrícolas, mientras que los forestales son los que más almacenan. Por consiguiente, reforestar suelos agrícolas abandonados tiene sentido.

Pero reforestar zonas ocupadas por prados o matorrales es algo bien distinto. Hoy día muchos pastizales son abandonados debido a la progresiva desaparición de la ganadería extensiva,



y en muchas partes del mundo, entre ellas España, resulta frecuente la progresiva invasión de los pastizales por formaciones arbustivas. En cuanto a los matorrales, su utilidad es a menudo dudosa para los propietarios. Por tanto, tiene cierta lógica que muchos de ellos se planteen reforestar estas zonas, porque al fin y al cabo, la madera es un artículo de valor. Pero si el objetivo consiste en secuestrar carbono en el suelo (de cara a cumplir con los compromisos internacionales de mitigación del cambio climático, por ejemplo), reforestar prados y matorrales abandonados no es la mejor opción necesariamente. En particular en la España húmeda.

EL EFECTO DE LA REFORESTACIÓN

Lo dicho anteriormente indica que, a pesar de todo, de cara a secuestrar carbono en el suelo, repoblar con bosques los suelos agrícolas que se abandonan sigue teniendo sentido, especialmente en las zonas semiáridas y mediterráneas. La apuesta parece clara: repoblemos un cultivo abandonado con, pongamos por caso, un pinar, y el suelo acumulará carbono. Pero no resulta tan sencillo. En realidad, a menudo durante los primeros años el suelo perderá carbono.

El fenómeno tiene nombre. Se trata de la curva de Covington, un término algo inapropiado, porque su descubridor, el ecólogo William W. Covington, de la Universidad del Norte de Arizona, lo describió solo en la capas de hojarasca superficial en un

artículo ya clásico publicado en 1981. En concreto, observó que tras una tala estas capas pierden grosor (y materia total) debido a su descomposición progresiva y a la ausencia de entradas nuevas. El fenómeno al que nos referimos tiene más calado, porque de hecho puede afectar también al suelo mineral (es decir, la parte del suelo dominada por materia mineral, que queda debajo del mantillo de hojarasca).

Un ejemplo interesante de ello en España lo ofrecen los estudios realizados por el equipo de Agustín Merino, de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes de Lugo, y centrados en las repoblaciones de pino insigne (*Pinus radiata*) sobre cultivos abandonados en las comarcas cercanas a Lugo. En la investigación se comparó el carbono edáfico de plantaciones de pino de edad creciente con el de una zona adyacente dedicada al cultivo. Los resultados revelaron que, en los primeros diez años tras la plantación, el contenido de carbono del suelo era siempre inferior al del suelo agrícola. En la década posterior empezaban a aparecer algunos casos en que el contenido de carbono era superior bajo la plantación, y a partir de los veinte años esto sucedía ya en la mayoría de los casos. Así, en estas plantaciones parecen bastar unos veinte o veinticinco años para que la reforestación suponga una ganancia neta de carbono, en comparación con el cultivo adyacente.

No siempre se encuentran ejemplos tan diáfanos como el mencionado: la variabilidad espacial, la complejidad en el relieve de las zonas repobladas o los cambios en la litología (que se traducen en cambios en las características del suelo) pueden hacer difícil detectar tendencias coherentes como la mostrada. Citando a Ramon Margalef, la complejidad de la naturaleza es tan apasionante como, a veces, exasperante. Sin embargo, parece claro que los primeros años tras la repoblación son críticos para el balance de carbono: en ellos se da un riesgo elevado de que el secuestro sea negativo. Comprender el origen del problema puede ser clave para aminorarlo o incluso evitarlo.

LOS PRIMEROS AÑOS

Cuando el establecimiento de una plantación forestal va acompañado de trabajos de preparación del terreno que incluyan roturación, subsolado y, en general, cualquier agresión física sería al suelo, la pérdida de carbono puede darse por hecha. Este tipo de actividades tienen un efecto destructivo importante sobre la estructuración del suelo en agregados, responsables en gran parte de la estabilización del carbono. Que la repoblación se realice reduciendo al mínimo el impacto físico sobre el suelo es, pues, crucial. El uso de maquinaria pesada en la preparación del terreno debería evitarse. Ello reviste especial importancia cuando la zona que se reforesta no es una parcela agrícola abandonada, sino un área de vegetación quizá no muy interesante desde un punto de vista económico (eriales, matorrales), pero que puede almacenar una cantidad de carbono considerable: en este caso la pérdida puede ser superior a lo que el bosque será capaz de secuestrar en décadas.

Aun cuando se eviten las agresiones físicas al terreno, es muy probable que se produzcan pérdidas de carbono edáfico. Si antes de la repoblación el suelo se hallaba cubierto por algún tipo de vegetación, como plantas herbáceas o matorral bajo, es posible que tras los trabajos de plantación una parte del suelo pierda esta vegetación protectora y quede expuesto a la atmósfera y a la radiación solar. En estas condiciones puede esperarse un aumento de la actividad microbiana en el suelo, con la consiguiente descomposición de la materia orgánica y pérdida de carbono.

Ambos problemas son evitables solo en parte. Pueden diseñarse métodos de plantación que obvien en lo posible el uso de maquinaria pesada, pero es inevitable la frecuentación de la parcela por los operarios que llevan a cabo los trabajos. En zonas con pendientes acusadas, esta simple frecuentación causa una agresión importante a la superficie del suelo, lo que se traducirá en pérdidas importantes de carbono. En cualquier caso, el objetivo debe ser evitar en lo posible la pérdida de cubierta vegetal herbácea o arbustiva; y, cuando esta se produzca, promover su pronta recuperación.

De cara a sortear tales problemas, el sueño de cualquier ecólogo empeñado en favorecer el secuestro de carbono en el suelo no son las plantaciones, sino los bosques subespontáneos, sobre todo los que se desarrollan en zonas cultivadas antiguamente. Cuando la parcela agrícola en desuso se sitúa al lado de un bosque natural, no será difícil que este invada el terreno que se le ofrece. En tal caso, la recolonización no implicará ningún tipo de trabajo físico humano sobre el terreno, por lo que la perturbación será escasa o nula y el secuestro de carbono se podrá desarrollar casi sin trabas.

Sin embargo, incluso en esa situación ideal también puede darse una pérdida inicial de carbono en el suelo. Como ejemplo, ofrecemos los datos obtenidos por el autor en un bosque subespontáneo de la comarca barcelonesa del Bages. El bosque, un pinar de *Pinus nigra* formado en una parcela de cultivo abandonada hace unos treinta años, es aún claramente joven e inmaduro. Su contenido de carbono en la superficie del suelo es superior al del cultivo adyacente. Sin embargo, a medida que nos adentramos en el suelo, la situación se invierte: por debajo de los diez centímetros la concentración de carbono es superior en la parcela agrícola. Y lo es también la cantidad de carbono acumulada en los primeros treinta centímetros del suelo mineral. En este ejemplo, pues, el efecto de los primeros años tras la recolonización del cultivo abandonado por el pinar ha sido una redistribución vertical del carbono en el perfil, sin cambios significativos en la reserva de carbono en el suelo mineral.

Esta es, sin embargo, una visión incompleta. Porque hemos obviado una parte muy característica de los suelos forestales: el mantillo de hojarasca, del que hablamos a continuación.

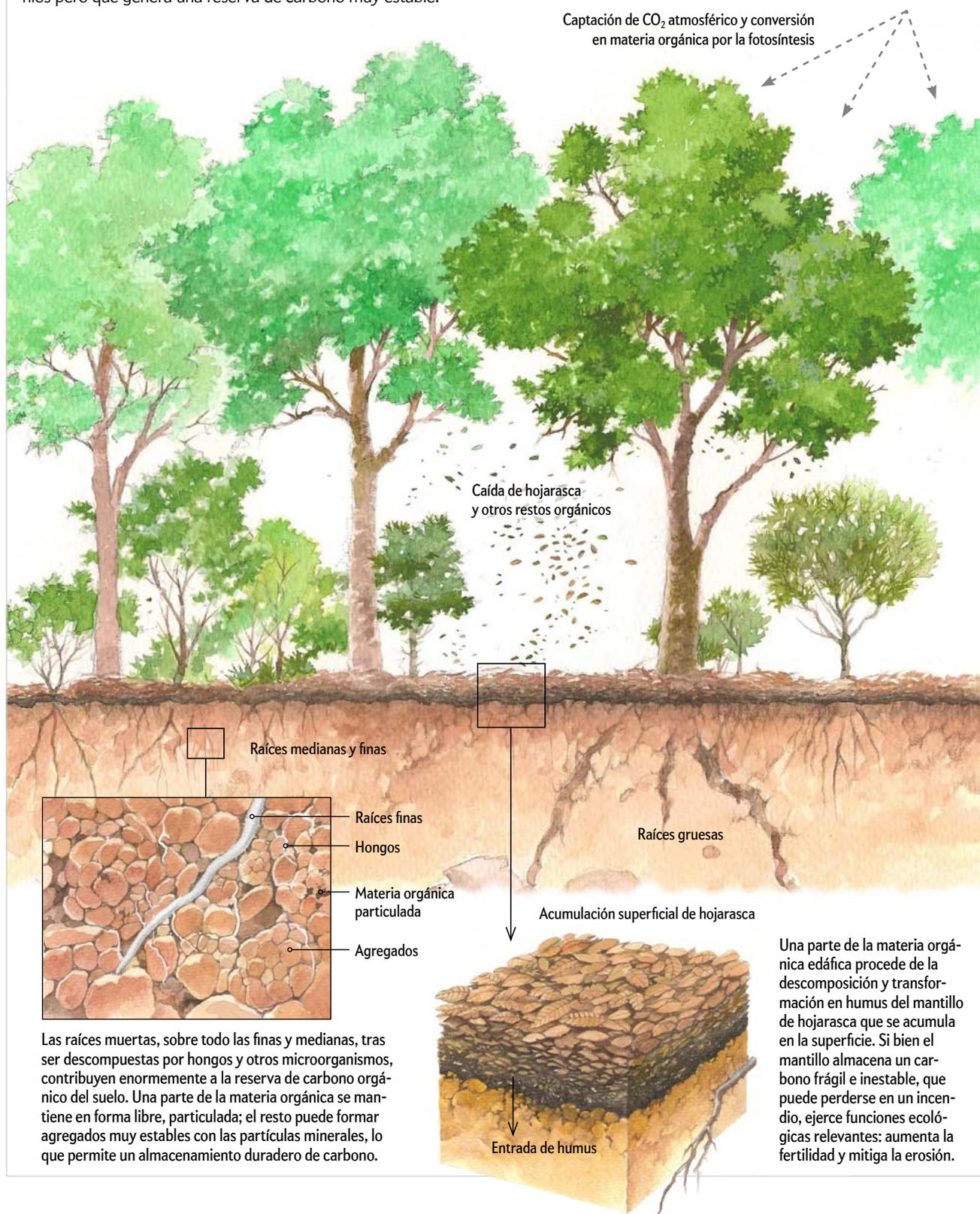
HOJARASCA Y RAÍCES

El mantillo de hojarasca, muy visible en los bosques, pero menos evidente en otros tipos de vegetación —en particular, prados— e inexistente en los suelos agrícolas —salvo aquellos sometidos a agricultura sin labranza—, da una personalidad muy especial a los suelos forestales. Ejerce una enorme influencia en la capa más superficial del suelo mineral, que los edafólogos denominan horizonte A_1 , y que en los suelos forestales suele ser muy rico en carbono orgánico.

Pero, según ya hemos comentado, la reserva de carbono en estos suelos suele ser inferior a la que cabría suponer. Ello se debe a que el contenido de carbono en ellos desciende en profundidad más rápidamente que en los de otros tipos de vegetación. La fuente principal de ese carbono no es la hojarasca, como se podría pensar. Tal era la idea que se ofrecía en algunos tratados clásicos de edafología, que en las décadas de los setenta y los ochenta dedicaban capítulos enteros a resaltar el efecto de factores como la calidad de la hojarasca sobre la cantidad y las características de la materia orgánica almacenada en el suelo mineral. Conceptos como «hojarasca mejorante» u «hojarasca acidificante» se hicieron populares entre los estudiosos del hu-

De la atmósfera al suelo

Los suelos presentan una elevada capacidad de almacenar carbono en forma de materia orgánica, por lo que pueden contribuir a reducir el exceso de dióxido de carbono de la atmósfera. Las plantas captan el carbono de este gas y, a través de la fotosíntesis, lo incorporan a sus estructuras vegetales (hojas, ramas, raíces, etcétera), que, al morir, se incorporan al suelo. Los restos vegetales se descomponen, se transforman en humus y se incorporan al suelo mineral subyacente, un proceso que puede tardar siglos o milenios pero que genera una reserva de carbono muy estable.



Las raíces muertas, sobre todo las finas y medianas, tras ser descompuestas por hongos y otros microorganismos, contribuyen enormemente a la reserva de carbono orgánico del suelo. Una parte de la materia orgánica se mantiene en forma libre, particulada; el resto puede formar agregados muy estables con las partículas minerales, lo que permite un almacenamiento duradero de carbono.

LA COLONIZACIÓN de las zonas agrícolas por bosques no conlleva necesariamente una ganancia de carbono a corto plazo. Se ilustra el ejemplo de dos parcelas adyacentes estudiadas cerca de Cardona, en la comarca barcelonesa del Bages, una dedicada al cultivo (izquierda) y la otra ocupada por un pinar subespontáneo de *Pinus nigra* de treinta años de edad (derecha). El suelo de este último almacena en conjunto menos carbono que el agrícola, aunque contenga más en las capas superficiales (tabla).



mus, e incluso entre algunos grupos ecologistas que convirtieron las pináceas en el «coco» de la ecología forestal. Sin renegar de los conocimientos acumulados durante aquellos años, hoy día parece bien establecido que son las raíces la fuente principal de materia orgánica para el suelo mineral. El papel de la hojarasca sería más bien secundario.

Ello tiene varias consecuencias. De entrada, la preocupación por si la hojarasca es «mejorante» o «acidificante» pierde algo de su relevancia. Pero, además, implica que la acumulación de grandes cantidades de carbono edáfico no estará relacionada con la formación de gruesos mantillos de hojarasca, sino con la producción de tupidos sistemas de raíces. La riqueza de materia orgánica en los suelos bajo pastizal suele atribuirse precisamente a la abundancia de raíces y al hecho de que se distribuyen de forma relativamente homogénea hasta una profundidad considerable. Tales sistemas son esperables también en matorrales o pastizales densos, pero no —o mucho menos— en un bosque maduro, donde el cierre de las copas disminuye la llegada de luz al suelo y dificulta el desarrollo de un sotobosque denso.

Bajo un bosque maduro, los pies de cualquier visitante pueden llegar a hundirse decenas de centímetros en gruesos mantillos de hojas muertas, progresivamente ennegrecidas y humificadas a medida que se acercan a la superficie del suelo mineral. En bosques boreales, estos mantillos de hojarasca pueden tener un grosor notable (de un metro o más) y representar la mayor parte de la reserva total de carbono del suelo. Por el contrario, en nuestras latitudes suelen suponer menos del 10 por ciento del total. Sin embargo, representan una entrada neta de carbono al suelo, en relación con el suelo agrícola original, desprovisto de mantillo. Y, sobre todo, constituyen un secuestro cuantificable: el incremento temporal de la cantidad de carbono en la hojarasca es mucho más fácil de medir que los cambios en el contenido de carbono del suelo mineral, que pueden quedar enmascarados por la variabilidad espacial, a menudo enorme. Es, además, un secuestro rápido: mientras que en el suelo mineral la reserva de carbono necesita siglos para llegar a su nivel máximo, en el mantillo de hojarasca este nivel máximo a menudo se consigue al cabo de tres a cuatro décadas. La facilidad de cuantificar este secuestro neto de carbono en el suelo ha hecho de la acumulación de hojarasca un tema del gusto de muchos edafólogos.

Profundidad	Reserva de carbono (kg/m ²)	
	Cultivo	Bosque
De 0 a 5 cm	0,85 ± 0,29	1,45 ± 0,18
De 5 a 15 cm	1,80 ± 0,08	1,28 ± 0,17
De 15 a 30 cm	2,12 ± 0,48	1,48 ± 0,43
Total acumulado	4,77 ± 0,60	4,20 ± 0,47

Sin embargo, el carbono secuestrado en la hojarasca es, también, frágil. Se descompone (y se transforma en CO₂) más deprisa que el del suelo mineral y, un detalle importante, suele perderse por completo cuando se produce un incendio. Resulta, por tanto, doblemente vulnerable. Los incendios forestales, incluidos los prescritos (incendios suaves que se realizan de forma deliberada y controlada para disminuir el sotobosque y reducir el riesgo de incendios incontrolables en verano) suelen destruir la capa de hojarasca, en tanto que el carbono ubicado en el suelo mineral apenas se ve afectado, al menos de forma inmediata.

EL FACTOR TIEMPO

Queda por mencionar un último factor que influye en el secuestro de carbono: el tiempo. En unos cincuenta años, si el lugar es apropiado (suelo profundo, pluviosidad adecuada, buena insolación), un pinar puede haber crecido lo bastante para ofrecer al visitante un aspecto espléndido. Pero el suelo tiene su propia dinámica, mucho más lenta: cincuenta años son pocos para que se desarrolle un perfil maduro de materia orgánica. La acumulación de una cantidad importante de carbono en el suelo no es cuestión de décadas, sino de siglos. Demasiado tiempo para la mayoría de los gestores del territorio de hoy en día.

Así, en una zona de bosque que se tala y a continuación se replanta (una práctica habitual en los bosques gestionados) suele producirse una pérdida de carbono edáfico. Esta pérdida va recuperándose con el tiempo, pero pueden necesitarse décadas para que la reserva de carbono alcance el nivel anterior a la tala. Si el ciclo de corta es inferior a este lapso de tiempo, el resultado a largo plazo será una pérdida de carbono generalizada, en lugar del secuestro neto que se deseaba.

Además, es impensable que el secuestro de carbono en el suelo se convierta en la única razón para reforestar zonas impro-

ductivas: cualquier propietario deseará lógicamente sacar algún beneficio de sus bosques. Por tanto, si el bosque es productivo probablemente se someterá a alguna tala, entresaca u otro tipo de explotación (como la extracción de biomasa para usos de calefacción, actividad potenciada desde algunos ámbitos), lo que puede dar lugar también a pérdidas de carbono en el suelo.

El carbono incorporado al suelo mineral tras la plantación no solo resulta difícil de cuantificar, sino que además es frágil, ya que puede perderse con bastante facilidad. Ello no solo es debido a que el bosque será frecuentado y parcialmente aprovechado, aun antes de ser talado. También es debido a que el carbono que haya sido secuestrado tras la plantación (la reserva nueva de carbono) suele ser menos estable que el preexistente en el suelo agrícola. Hay varias razones de esta menor estabilidad. En primer lugar, se trata de un carbono más joven, menos humificado que el preexistente; asimismo, por ser reciente, ha tenido poco tiempo para asociarse a arcillas y formas libres de hierro o aluminio, capaces de estabilizar la materia orgánica a muy largo plazo.

La fragilidad del carbono recién secuestrado en el suelo, de una antigüedad inferior a un siglo, parece, pues, inevitable. Las grandes reservas de carbono de los suelos forestales antiguos y maduros no son el resultado de unas pocas décadas de captar, humificar y estabilizar hojarasca y raíces muertas, sino el punto final de una evolución de siglos o incluso milenios. Visto desde esta perspectiva, muchos de los actuales suelos forestales de España se hallan aún en la infancia, y la vulnerabilidad de sus reservas de carbono, relativamente recientes, recuerda mucho la de la salud de los niños de un parvulario.

EPPUR SI MUOVE

Pero se mueve. La frase se atribuye, probablemente de forma apócrifa, a Galileo en el momento de retractarse de sus teorías ante el tribunal eclesiástico que lo amenazaba con la hoguera. La Tierra se movía, a pesar de todo. Y, en muchos países del mundo, los suelos bajo bosques o plantaciones forestales jóvenes siguen secuestrando carbono. A pesar de todo.

En este artículo hemos expuesto una serie de hechos que deben tenerse en cuenta a la hora de valorar las reforestaciones. La intención es resaltar que no son una panacea a la que haya que confiar toda una política de mitigación del cambio climático. Pero ello no significa que reforestar sea un error, en especial cuando hablamos de reforestar cultivos abandonados, y muy especialmente en la España seca (zonas mediterráneas y semiáridas). Que los incrementos esperables en la reserva de carbono edáfico a menudo no resulten espectaculares no significa que sean irrelevantes.

Ecológicamente hablando, los resultados serán positivos en numerosos aspectos. A corto plazo, reforestar un cultivo abandonado —y mejor aún, permitir la recuperación espontánea del bosque cuando hay un bosque adyacente que lo facilite— aumentará la concentración de carbono en la capa más superficial del suelo y lo cubrirá con un mantillo de hojarasca. La combinación de ambos fenómenos es un antídoto excelente contra la erosión, al que habrá que añadir la acción protectora de las copas, cuando la plantación o el bosque subespontáneo haya llegado a cierto desarrollo. Más allá del freno de la erosión, hay que recordar la estrecha relación entre fertilidad del suelo y contenido de materia orgánica. La materia orgánica aumenta la retención de nutrientes (en especial los que se hallan en forma catiónica: amonio, potasio, calcio), y en sí misma es un gran contenedor de nutrientes (en especial, nitrógeno y fósforo). También aumenta

la capacidad de retención de agua, regula el pH, y, en conjunto, facilita la creación en el suelo de un microambiente favorable a la actividad microbiana.

Queda un punto final para la discusión. Es la cuestión de si la reforestación es el único destino deseable para una parcela agrícola abandonada. Un bosque es un ecosistema costoso, en términos hídricos. La proliferación de bosques afecta al ciclo del agua a escala regional, porque aumenta sobremedida la evapotranspiración (la pérdida de agua debida a la evaporación y a la transpiración de las plantas). La disminución actual de los caudales de agua continentales (torrentes, riachuelos, manantiales) puede ser síntoma de un cambio climático ya en curso, pero para muchos está relacionada con la proliferación masiva de bosques en nuestro país, plantados o subespontáneos. Este problema, junto con la necesidad de mantener una heterogeneidad paisajística, clave para el mantenimiento de la biodiversidad, podría llevar a sopesar la conveniencia, en algunos casos, de no reforestar. Máxime cuando, como hemos visto, en amplias zonas de España los suelos de prados y matorrales parecen secuestrar mejor el carbono que los de bosques, sean naturales o plantados.

Esta cuestión daría lugar a un debate muy amplio que escapa al ámbito de este artículo: el uso social del territorio, para que cumpla las funciones que se esperan de él. Estas funciones van más allá del mero secuestro de carbono. A medida que una sociedad se desarrolla, espera de su territorio algo más que producir: desea lugares de recreo, deporte, solaz paisajístico, mantenimiento de la biodiversidad y un etcétera tan largo como la imaginación del lector. Y cada uno de estos usos tendrá un efecto particular sobre la reserva de carbono edáfico, no necesariamente positivo. Parafraseando la sentencia célebre mencionada en el clásico film de Orson Welles *Ciudadano Kane*, secuestrar mucho carbono en el suelo no es difícil; a condición de que el único objetivo previsto para el suelo sea precisamente secuestrar carbono. Ello no sucederá nunca. Quizá sea este el principal reto al que se deberá enfrentar la ya famosa iniciativa del cuatro por mil. 

PARA SABER MÁS

Organic carbon content under different types of land use and soil in peninsular Spain. J. C. Rodríguez Murillo en *Biology & Fertility of Soils*, vol. 33, págs. 53-61, 2001.

Captura de C en terrenos agrícolas reforestados con *Pinus radiata* en el norte de España. C. Pérez Cruzado et al. en *La captura de carbono en ecosistemas terrestres iberoamericanos*, dirigido por J. F. Gallardo Lancho, págs. 195-212, 2007.

An appraisal of soil organic C content in Mediterranean agricultural soils. J. Romanyà y P. Rovira en *Soil Use and Management*, vol. 27, págs. 321-332, 2011.

Soil carbon stocks and their variability across the forests, shrublands and grasslands of peninsular Spain. E. Doblas Miranda et al. en *Biogeosciences*, vol. 10, págs. 8353-8361, 2013.

Assessment of the soil organic carbon stock in Spain. J. A. Rodríguez Martín et al. en *Geoderma*, vol. 264, págs. 117-125, 2016.

Soil carbon 4 per mille. B. Minasny et al., en *Geoderma*, vol. 292, págs. 59-86, 2017.

Enlace a la página web del Ministerio de Agricultura francés, en que se expone la iniciativa cuatro por mil: <http://agriculture.gouv.fr/rejoignez-linitiative-4-pour-1000>

EN NUESTRO ARCHIVO

El humus. Juan F. Gallardo en *lyC*, julio de 1980.

Una solución integral al carbono

EN SÍNTESIS

Una manera de reducir las emisiones de carbono sería capturarlo antes de que se incorporase a la atmósfera y enterrarlo a grandes profundidades. Sin embargo, debido a su elevado coste, la mayoría de los países no lo llevan a cabo.

Una posibilidad consistiría en extraer salmuera caliente del subsuelo, inyectar en ella CO_2 y volver a enterrarla. El proceso permitiría aprovechar la energía geotérmica del fluido y también extraer el metano disuelto.

Dicho ciclo resultaría económica y energéticamente rentable. La salmuera contenida en la costa del Golfo de EE.UU. permitiría almacenar una sexta parte de las emisiones del país y cubrir un sexto de su demanda de gas natural al año.

Steven L. Bryant, experto en almacenamiento geológico de dióxido de carbono con más de 13 años de experiencia en el sector industrial, es profesor del Departamento de Ingeniería Química y Petrolera de la Universidad de Calgary.



¿Y si explotáramos los yacimientos de salmuera rica en metano y su energía se emplease para secuestrar carbono?

Steven L. Bryant

SE CUENTA QUE MARK TWAIN DIJO UNA VEZ QUE, AUNQUE TODO EL MUNDO SE QUEJA del tiempo, nadie hace nada al respecto. Un Mark Twain moderno tal vez observase que todo el mundo habla del cambio climático, pero que nadie adopta medidas firmes. Una de las razones principales es económica. Reducir la acumulación atmosférica de dióxido de carbono —el principal factor humano responsable del calentamiento— implicaría un oneroso abandono del carbón y el petróleo como fuentes principales de energía. Una alternativa consistiría en capturar el CO₂ emitido por la industria y almacenarlo en un lugar donde pudiese permanecer durante siglos. Sin embargo, la tecnología necesaria para ello implica también grandes costes.

Pero ¿y si fuese rentable hacer ambas cosas a la vez: producir enormes cantidades de energía y reducir las emisiones? ¿Y qué ocurriría si la tecnología necesaria para ello se ajustase a la infraestructura industrial ya existente? Tal situación podría tornarse realidad en la costa del Golfo estadounidense. Debido a sus peculiares características geológicas, dicha región resulta apta para enterrar ingentes cantidades de CO₂ disuelto en salmuera caliente a varios kilómetros de profundidad. Al

mismo tiempo, ese almacenamiento generaría un gran volumen de metano, el cual podría emplearse como combustible, así como calor para consumo doméstico. Por sí mismos, ni el almacenamiento de CO₂ ni la producción de metano o de energía geotérmica son rentables. Sin embargo, algunos cálculos recientes demuestran que, combinados, dichos procesos reportarían buenos resultados tanto en EE.UU. como en otros países.

LA LEY DE LA GRAVEDAD

¿Metano? ¿Uno de los peores responsables del cambio climático? ¿El gas que puede fugarse en las zonas donde se han efectuado fracturaciones hidráulicas y cuya potencia de calentamiento resulta, molécula por molécula, 20 veces superior a la del CO₂? En efecto, metano.

Para entender la idea, consideremos primero el proceso de captura y enterramiento, o «secuestro», de carbono. Fue pensar en tales objetivos lo que, junto con mis colaboradores, nos llevó a formular una propuesta aparentemente herética.

El secuestro de carbono consiste en atrapar el CO₂ allí donde se emite (lugares como las chimeneas de una central de combustibles fósiles) y apartarlo antes de que se incorpore a la atmósfera. «Almacenarlo» suena sencillo, pero el único depósito cercano y lo bastante grande como para albergar enormes cantidades de CO₂ es el subsuelo. Según los expertos, los poros de las rocas sedimentarias emplazadas en los kilómetros más superficiales de la corteza terrestre podrían acumular una cantidad de CO₂ equivalente a siglos de emisiones, al menos en teoría.

Almacenar el 15 por ciento de las emisiones de EE.UU. requeriría secuestrar una gigatonelada de CO₂ al año. La industria energética global extrae anualmente unas cuatro gigatoneladas de crudo y unas dos gigatoneladas de gas natural a partir de rocas sedimentarias. Dicha cifra sugiere que enterrar una gigatonelada de CO₂ comprimido debería resultar factible, si bien supondría un esfuerzo mayúsculo. Por supuesto, si otros cambios como mejorar la eficiencia energética o apostar por fuentes de energía alternativas se aplicasen a una escala similar, se reduciría en primer lugar el volumen de CO₂ generado.

El siguiente paso parece obvio: comenzar ya a adaptar las técnicas de producción de petróleo y gas para implementar el almacenamiento geológico de carbono. Por desgracia, esa estrategia ha de hacer frente a un inconveniente fundamental: con el tiempo, el CO₂ tendería a emerger de nuevo hacia la superficie a través de fisuras y poros. Para impedirlo, deberíamos disponer de un «sello» impermeable, un estrato rocoso con poros tan diminutos que el gas no pudiera atravesarlos.

La industria petrolera se beneficia de la existencia de tales flujos ascendentes. El petróleo y el gas de los yacimientos subsuperficiales llegaron a ellos desde rocas más profundas, a través de diversos conductos. A lo largo de su lento y prolongado ascenso, una fracción del fluido queda atrapado, pero gran parte de él prosigue su migración hasta la superficie. Durante los inicios de la industria petrolera, la mayoría de las compañías perforaban allí donde se observaban fugas superficiales.

Los estudios de plumas subterráneas de CO₂ llevados a cabo por varios científicos muestran una situación similar. Aunque numerosas estructuras geológicas impiden el paso del CO₂, siempre aparecen conductos que permiten su ascenso. Sin embargo, los ingenieros podrían sacar partido de una interesante peculiaridad del dióxido de carbono: aunque la mayoría de los líquidos se tornan menos densos cuando en ellos se disuelve un gas, al inyectar CO₂ en agua, la densidad aumenta. La mayor parte del líquido acuoso que descansa en las profundidades es salmuera (agua muy salina), cuya densidad también se incrementa al incorporar CO₂. Por tanto, si el dióxido de carbono se almacenase de esa forma, el riesgo de ascenso desaparecería, ya que tendería a hundirse y aumentaría la seguridad de la captura.

ENERGÍA PARA CUBRIR LOS GASTOS

El problema reside en que, en las condiciones de temperatura y presión a las que suelen encontrarse las salmueras profundas, el

CO₂ tarda mucho en disolverse por sí solo. De modo que, hace un tiempo, junto con Mac Burton, por entonces uno de mis estudiantes de doctorado, propusimos una idea radical: excavar un pozo hasta la salmuera, traerla la superficie, presurizarla, inyectar CO₂ (que se disolvería rápidamente en un tanque de mezcla) y enviarla de regreso al subsuelo.

Pero semejante plan requeriría grandes cantidades de energía. Además, la salmuera puede retener relativamente poco CO₂ en peso, por lo que deberían extraerse cantidades enormes. Cualquiera de estos dos inconvenientes amenazaba con echar por tierra la idea.

El segundo problema no parecía tan desalentador. En las reservas petrolíferas, las compañías suelen excavar varios pozos equidistantes. A través de un conjunto de ellos se inyecta agua o salmuera, la cual presiona el petróleo profundo y fuerza su ascenso por las otras perforaciones de la explotación. Hoy en día, la industria inyecta en los yacimientos de combustibles fósiles unas 10 gigatoneladas anuales de salmuera, la mayoría extraída en el mismo lugar. Por tanto, debería resultar factible lograr el flujo de salmuera necesario para enterrar grandes volúmenes de CO₂. En un mismo punto de almacenamiento, una serie de pozos extraerían el fluido salino; al mismo tiempo, la salmuera con el CO₂ disuelto se inyectaría a través de otras perforaciones.

El primer inconveniente —el capital necesario para excavar los pozos y la energía requerida para mantenerlos en funcionamiento— se antojaba mucho más difícil de superar. La razón por la que la industria no se ha apresurado a capturar y almacenar el CO₂ obedece a la falta de incentivos económicos: en general, las emisiones no se gravan con sanciones o impuestos, y los argumentos de política ambiental basados en la necesidad de proteger el planeta o en cubrir el «coste total» del uso de combustibles fósiles (incluida la alteración del medioambiente) no han persuadido a nadie para imponer tales medidas. A primera vista, no parecía haber ningún mecanismo para financiar la inyección de CO₂ en salmuera.

No hace mucho, sin embargo, desde uno de los despachos de la Universidad de Texas en Austin muy próximo al mío, surgió una idea prometedora. Gary Pope, catedrático en ingeniería petrolífera que ha dedicado la mayor parte de su carrera a mejorar los métodos de extracción de crudo, reparó en la posibilidad de explotar un recurso oculto.

El golfo de México, al igual que otras regiones productoras de petróleo del mundo, alberga acuíferos salinos profundos ricos en metano disuelto. El metano es uno de los componentes principales del gas natural, por lo que puede emplearse como combustible o distribuirse con facilidad a lo largo de una red de gasoductos. Por tanto, una vez que la salmuera llegase a la superficie, podríamos extraer de ella el metano e inyectar CO₂. Incluso al bajo precio del gas natural, el beneficio obtenido gracias al metano y al calor geotérmico tal vez compensase los costes del secuestro de CO₂. El siguiente paso era estudiar si el proceso podía autofinanciarse. Junto con Pope, reclutamos a un estudiante de doctorado, Reza Ganjdanesh, para estudiar la cuestión.

En una perforación tradicional, la salmuera que asciende por un pozo de producción va perdiendo presión poco a poco y liberando una fracción del metano. Disolver CO₂ en la salmuera provoca la expulsión de más metano. Por otra parte, buena parte de los acuíferos de las costas de Texas y Luisiana emplazados a más de tres kilómetros de profundidad se hallan sometidos a altas presiones, por lo que se necesitaría poca energía, o ninguna en absoluto, para extraer la salmuera hasta la superficie.

Además, la elevada temperatura de los acuíferos permitiría emplear la salmuera como fuente de energía geotérmica. Según los cálculos de Ganjandesh, el proceso combinado (la extracción de metano y agua caliente al tiempo que se inyecta CO₂) liberaría bastante más energía que la requerida para llevar a cabo la operación. Tal forma de almacenamiento geológico de carbono, con un balance de energía positivo, resultaría atractiva desde el punto de vista económico incluso en un mundo sin tasas sobre las emisiones de carbono.

PERFORAR LA PIRÁMIDE

Nuestra propuesta también puede verse como un método para extraer combustible. Según un dicho popular en la industria de combustibles fósiles, el petróleo fácil está acabado. Y el gas fácil también. Las compañías han perforado durante décadas los yacimientos de petróleo y gas más accesibles, concentrados y fáciles de explotar, en los que el combustible ascendía sin problemas hacia la superficie. Pero, a medida que dichas reservas se han ido agotando, las empresas han comenzado a descender peldaños en la «pirámide de recursos», dirigiendo su interés hacia combustibles fósiles menos accesibles.

Entre los últimos tres y cinco años, la producción estadounidense de petróleo y gas ha aumentado gracias a la fracturación hidráulica de lutitas profundas. Pero extraer cualquier material a partir de dichas rocas supone una tarea lenta y ardua. Además, tanto el petróleo como el gas se encuentran en concentraciones mucho menores. Con todo, la fracturación hidráulica constituye el siguiente paso lógico en el descenso de la pirámide, pues aunque la demanda de combustible continúa creciendo, el número de reservas fáciles de explotar disminuye.

Pero la pirámide de recursos presenta una característica tentadora: por regla general, la cantidad de reservas aumenta cuanto más difícil resulta extraerlas. Solo el volumen de gas natural atrapado en lutitas ya lo convierte en un objetivo atractivo, por más que su extracción implique un proceso menos eficiente que la explotación tradicional.

Tras el gas de lutitas, el siguiente peldaño en la pirámide de recursos sería el metano disuelto en yacimientos de salmueras. Si bien este combustible se encuentra cinco veces menos concentrado que en las lutitas, la cantidad total disponible resulta asombrosa. Según las estimaciones realizadas para el golfo de México, su volumen oscilaría entre varias decenas y algunas centenas de billones de metros cúbicos (Tm³). Como referencia, el consumo estadounidense de gas natural durante la última década ha oscilado entre 0,56 y 0,7 Tm³.

A la vista de semejantes reservas, durante los años setenta y ochenta, el Departamento de Energía (DOE) estadounidense excavó varios pozos a fin de sondear los depósitos profundos de salmuera. Si bien esta logró extraerse, la producción de metano a partir de agua salina no podía competir en términos económicos con otras fuentes.

Aún hoy, la extracción de metano a partir de salmuera sigue sin poder pugnar en el mercado. Sin embargo, su otro gran beneficio potencial —la producción de energía geotérmica— tal vez modifíquese la ecuación. Medido en escalas de tiempo humanas, el calor del interior de la Tierra proporciona una fuente de energía indefinida. Al igual que otros recursos del subsuelo, su explotación requiere el empleo de pozos de extracción e inyección, una técnica disponible y bien conocida. Si la producción de energía geotérmica a partir de salmuera no ha penetrado más en el mercado, se debe a que la densidad energética del agua caliente resulta unos dos órdenes de magnitud menor que

la que se obtiene a partir de la combustión del mismo volumen de carbón, petróleo o gas.

Esa valoración tan pesimista se refiere al aprovechamiento de la energía geotérmica para generar electricidad. Sin embargo, según un informe reciente del DOE, cerca del 10 por ciento del consumo energético estadounidense se destina a la calefacción y refrigeración de edificios y al agua caliente doméstica. Para ello, los 1200 grados Celsius de la llama de un calentador de gas resultan a todas luces excesivos. La energía geotérmica puede bastar para aplicaciones de baja intensidad, como el aire y el agua calientes. Desde hace años, las bombas geotérmicas han venido cumpliendo ese cometido con éxito en multitud de hogares europeos.

TRES EN UNO

Ni el enterramiento de CO₂ ni la extracción de salmuera para obtener metano o para aprovechar su energía geotérmica constituyen, por sí mismos, procesos económicamente viables. Pero la combinación de todos ellos comienza a parecerse a una banqueta con tres patas, en la que cada una garantiza la estabilidad de las otras dos. Con todo, la gran pregunta es si un sistema semejante podría secuestrar una cantidad de CO₂ suficientemente elevada para lograr una reducción apreciable del carbono acumulado en la atmósfera, tanto a una escala local como internacional.

En fecha reciente hemos realizado algunos cálculos relativos a la costa del Golfo. La región que alberga numerosas centrales de combustibles fósiles y varias industrias generadoras de grandes volúmenes de CO₂. Si se deseara mermar aún más las emisiones, el CO₂ podría también transportarse desde zonas distantes. El capital necesario para construir los gasoductos sería elevado, pero los costes de operación resultarían modestos.

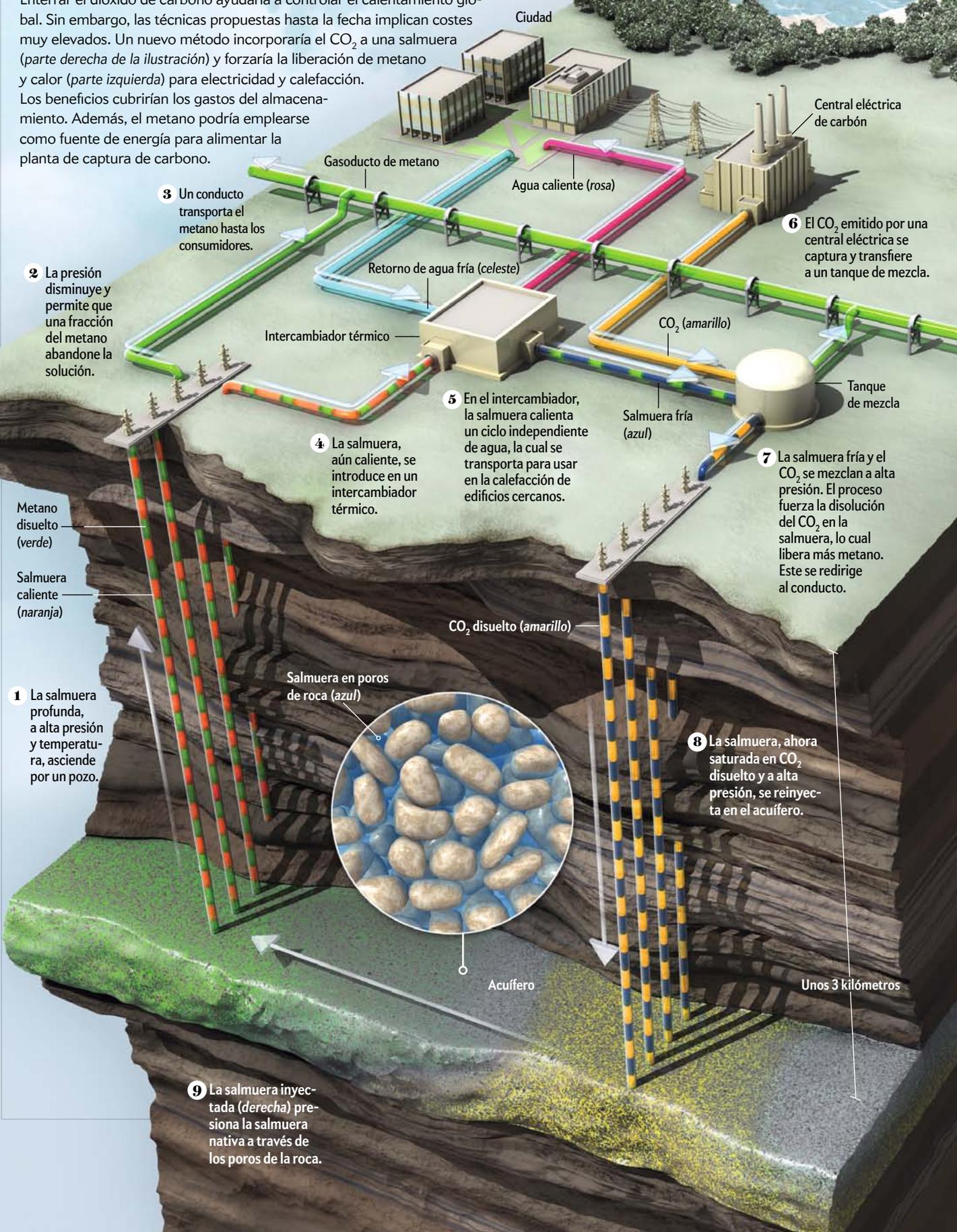
En ese aspecto, la escala del proyecto se antoja viable. En la década de los ochenta se construyeron más de 3400 kilómetros de gasoductos cerca de la cuenca pérmica del oeste de Texas. Su objetivo consistía en transportar el CO₂ desde yacimientos naturales profundos hasta campos de petróleo, donde se utilizaba para facilitar la extracción de crudo. La costa presenta enormes yacimientos profundos de salmuera y cuenta con una extensa infraestructura de gasoductos que abastecen al resto del país. Además, se trata de una región muy poblada, lo que posibilitaría la explotación local de la energía geotérmica.

Almacenar una gigatonelada de CO₂ al año (el equivalente a una sexta parte de la tasa de emisiones de EE.UU.) implicaría inyectar y extraer unos 400 millones de barriles de salmuera al día. Se trata de un volumen considerable, pero podría lograrse con unos 100.000 pozos. En comparación, en Texas, se han efectuado ya más de un millón de perforaciones para buscar petróleo y gas. La excavación de semejante cantidad de pozos llevaría décadas; sin embargo, cualquier otro método capaz de reducir una gigatonelada de emisiones de CO₂ al año requeriría un tiempo de construcción similar. Una manera de lograrlo, por ejemplo, sería reemplazar 200 de los gigavatios que hoy se generan en centrales de carbón estadounidenses por energía nuclear. Pero para ello deberían construirse unos 200 reactores de gran tamaño, lo que también llevaría décadas.

En este caso, sin embargo, la tasa de generación de energía permitiría además financiar la técnica. Almacenar una gigatonelada de CO₂ produciría unos 0,1 Tm³ de gas natural al año, cerca de una sexta parte del consumo estadounidense actual. En 2012, el país extrajo unos 0,25 Tm³ de gas natural a partir de lutitas, por un valor de unos 25.000 millones de dólares.

Eliminar CO₂ y obtener energía

Enterrar el dióxido de carbono ayudaría a controlar el calentamiento global. Sin embargo, las técnicas propuestas hasta la fecha implican costes muy elevados. Un nuevo método incorporaría el CO₂ a una salmuera (parte derecha de la ilustración) y forzaría la liberación de metano y calor (parte izquierda) para electricidad y calefacción. Los beneficios cubrirían los gastos del almacenamiento. Además, el metano podría emplearse como fuente de energía para alimentar la planta de captura de carbono.



La obtención de energía geotérmica también alcanzaría cotas notables. Si el calor se utilizara para suministrar aire y agua calientes (y si se aprovechara en intercambiadores de calor que transformasen el aire caliente en frío para aire acondicionado), la potencia generada equivaldría a la obtenida a partir del metano: unos 200 gigavatios. Desconocemos si existiría tanta demanda a lo largo de la costa del Golfo, aunque numerosas plantas petroquímicas de la región, así como las unidades de captura de carbono que se construirían, podrían consumir una buena parte. Como alternativa, si la energía geotérmica se convirtiese en electricidad con un 10 por ciento de eficiencia —lo habitual en otras zonas—, se producirían unos 20 gigavatios de electricidad, una cantidad nada despreciable. La capacidad eólica de EE.UU., por ejemplo, suma unos 50 gigavatios.

Nuestro sistema parece presentar unos índices de producción lo bastante elevados como para contribuir a una reducción de emisiones a gran escala. A un ritmo de almacenamiento de una gigatonelada al año, en un siglo se secuestrarían 100 gigatoneladas de CO₂ y se producirían unos 10 Tm³ de metano, menos de una décima parte de la cantidad que se cree contenida en los acuíferos profundos de la costa del Golfo. Por tanto, el método ofrece un amplio margen tanto para almacenar CO₂ como para suministrar metano.

Si ese metano se quemara en centrales eléctricas, aun sin capturar el CO₂ que liberara su combustión, la disminución neta de las emisiones de CO₂ equivaldría a 80 gigatoneladas en un siglo de funcionamiento. Se trataría, por tanto, de una reducción sustancial. Según los cálculos de la Unión de Científicos Preocupados (UCS), para que la concentración global de CO₂ atmosférico no supere las 450 partes por millón (el valor que suele considerarse límite para que el calentamiento no exceda los dos grados Celsius), EE.UU. y otros países industrializados deberían reducir sus emisiones hasta alcanzar, en 2050, en torno al 25 por ciento de los niveles del año 2000. Para ello, EE.UU. debería evitar la emisión de unas 150 gigatoneladas de CO₂ de aquí a 2050. Incluso si la captura con salmuera tardase 20 años en alcanzar una tasa de secuestro de una gigatonelada al año, aún podría dar cuenta del 15 por ciento de la reducción total que necesita el país.

Por supuesto, los pozos y las centrales de inyección de salmuera deberían construirse y mantenerse en funcionamiento con sumo cuidado, a fin de evitar fugas de metano a la atmósfera. Las perforaciones se asemejarían a los pozos costeros tradicionales de extracción de petróleo y gas, una técnica veterana. La Agencia de Protección Ambiental estadounidense cuenta con un sólido programa destinado a detectar las emisiones y su procedencia. Por otro lado, la industria no querrá perder la oportunidad de vender un producto con valor comercial. El procesado de la salmuera, del metano y del CO₂ no resultaría mucho más complejo que las operaciones realizadas en las centrales petroquímicas al uso. Por último, dado que en los yacimientos profundos solo se transferirían líquidos, tanto la perforación como la gestión de los pozos se asemejarían en gran medida a la extracción tradicional de petróleo. Adoptar dicho proceso evitaría los problemas asociados a la fracturación hidráulica de pizarras, la cual requiere inyectar en el subsuelo grandes volúmenes de agua dulce cargada de productos químicos, que luego debe desecharse de forma segura [véase «Los inconvenientes de la fracturación hidráulica», por Chris Mooney; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2012].

Además, las posibilidades de inducir actividad sísmica serían extremadamente reducidas. Las últimas investigaciones

revelan que la adición neta de grandes volúmenes de líquido en determinadas formaciones geológicas (una operación empleada en ocasiones para eliminar aguas residuales) puede acentuar el riesgo sísmico. Sin embargo, la explotación de salmuera tendría lugar como parte de un ciclo cerrado, ya que el fluido salino inyectado se habría extraído previamente de la misma formación rocosa. Por tanto, la presión media de la formación se mantendría constante.

Sin duda, levantar semejante sistema de explotación conllevaría un elevado coste que tal vez repercutiese en la factura de los consumidores. Pero lo mismo ocurriría con cualquier otra estrategia capaz de reducir de manera notable las emisiones de carbono, tanto si hablamos de construir miles de granjas solares y eólicas, como de reemplazar centrales de carbón por 200 nuevos reactores nucleares.

PRIMEROS PASOS

Tras realizar un gran número de cálculos, podemos decir que nuestro sistema de captura con salmuera parece funcionar sobre el papel. Las instalaciones de prueba desempeñarán una función decisiva a la hora de determinar si el método podrá llevarse a la práctica. Varios investigadores de los Laboratorios Sandia, el Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore y la Universidad de Edimburgo están diseñando métodos para inyectar CO₂ en salmuera y extraer energía de manera eficiente. Al mismo tiempo, dos compañías que prefieren permanecer en el anonimato están contemplando la posibilidad de construir centrales piloto en la costa del Golfo. Adquirir experiencia hoy constituiría un prudente ejercicio. Si el mundo alberga alguna esperanza de limitar el calentamiento global, las emisiones de CO₂ deberían comenzar a reducirse de inmediato.

La costa del Golfo en Estados Unidos ofrece un emplazamiento óptimo para llevar a cabo el secuestro de carbono con salmuera. No obstante, las emisiones representan un problema de dimensiones globales. Desconocemos en qué otras ubicaciones podría aplicarse este proyecto, pero el elemento clave es la salmuera rica en metano, cuya existencia puede esperarse allí donde hay hidrocarburos. China y Rusia, países con emisiones crecientes de carbono y extensas cuencas de petróleo y gas, podrían ser buenas zonas en las que comenzar a explorar. ■

PARA SABER MÁS

Eliminating buoyant migration of sequestered CO₂ through surface dissolution: Implementation costs and technical challenges. McMillan Burton y Steven L. Bryant en *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, vol. 12, n.º 3, págs. 399-407, junio de 2009.

Coupled CO₂ sequestration and energy production from geopressed-geothermal aquifers. Reza Ganjandesh et al. Presentado en el Congreso de Técnicas de Gestión de Carbono; Orlando, Florida, 7-9 de febrero de 2012.

Regional evaluation of brine management for geologic carbon sequestration. Hanna M. Breunig et al. en *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 14, págs. 39-48, mayo de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Qué hacer con el carbón? David G. Hawkins, Daniel A. Lashof y Robert H. Williams en *LYC*, noviembre de 2006 (número monográfico sobre energía).

Robert Kunzig, periodista científico con más de 30 años de experiencia, es editor de medioambiente en *National Geographic*. Autor de *Mapping the deep: The extraordinary story of ocean science*, por el que obtuvo el premio Aventis de libros científicos de 2001. Con Wallace S. Broecker publicó *Fixing climate: What past climate changes reveal about the current threat — and how to counter it*.



Escudos contra la radiación solar

El calentamiento global se ha convertido en una emergencia tal, que algunos expertos del clima están dispuestos a explorar soluciones que protejan la Tierra de los rayos solares. Ninguna de las soluciones propuestas resulta plenamente eficaz

Robert Kunzig

CUANDO DAVID W. KEITH, DE LA UNIVERSIDAD DE CALGARY en Alberta, dicta conferencias sobre geoingeniería, recuerda lo vieja que es la idea. Se piensa en la modificación deliberada del clima para contrarrestar el calentamiento global desde hace tanto como este preocupa. Allí por 1965, cuando Al Gore empezaba sus estudios universitarios, un comité de expertos en medio ambiente avisó al presidente Lyndon B. Johnson de que las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) por la quema de combustibles fósiles podrían causar «cambios importantes en el clima», «perjudiciales» sin duda. No mencionaron la posibilidad de reducir las emisiones. Sí se refirieron a otra idea: «la diseminación de partículas muy pequeñas y reflectantes» sobre cerca de quince millones de kilómetros cuadrados de océano. El propósito era desviar hacia el espacio un uno por ciento más de luz solar. «Una chifladura», dice Keith, «que no valdría para nada».

Aunque en los años siguientes no faltarían las propuestas de geoingeniería, cayeron todas en saco roto; científicos y eco-

logistas las consideraron necias, si no inmorales, un intento de eludir la verdadera raíz del calentamiento global. Tres hechos recientes han llevado a que hoy la geoingeniería goce de mejor reputación.

En primer lugar, a pesar de los muchos años de diálogos y de tratados internacionales, las emisiones de CO₂ siguen creciendo más rápidamente de lo que el Panel Intergubernamental del Cambio Climático, hace tan solo un par de años, había predicho para el peor de los casos. Y, como dice Ken Caldeira, de la Institución Carnegie para las Ciencias en Stanford, siguen tendiendo a crecer, igual que la dependencia del carbón.

En segundo lugar, el hielo se funde más deprisa que nunca en los polos. Podría significar que el clima está mucho más cerca del límite, de un punto de avalancha de cambios, de lo que se pensaba.

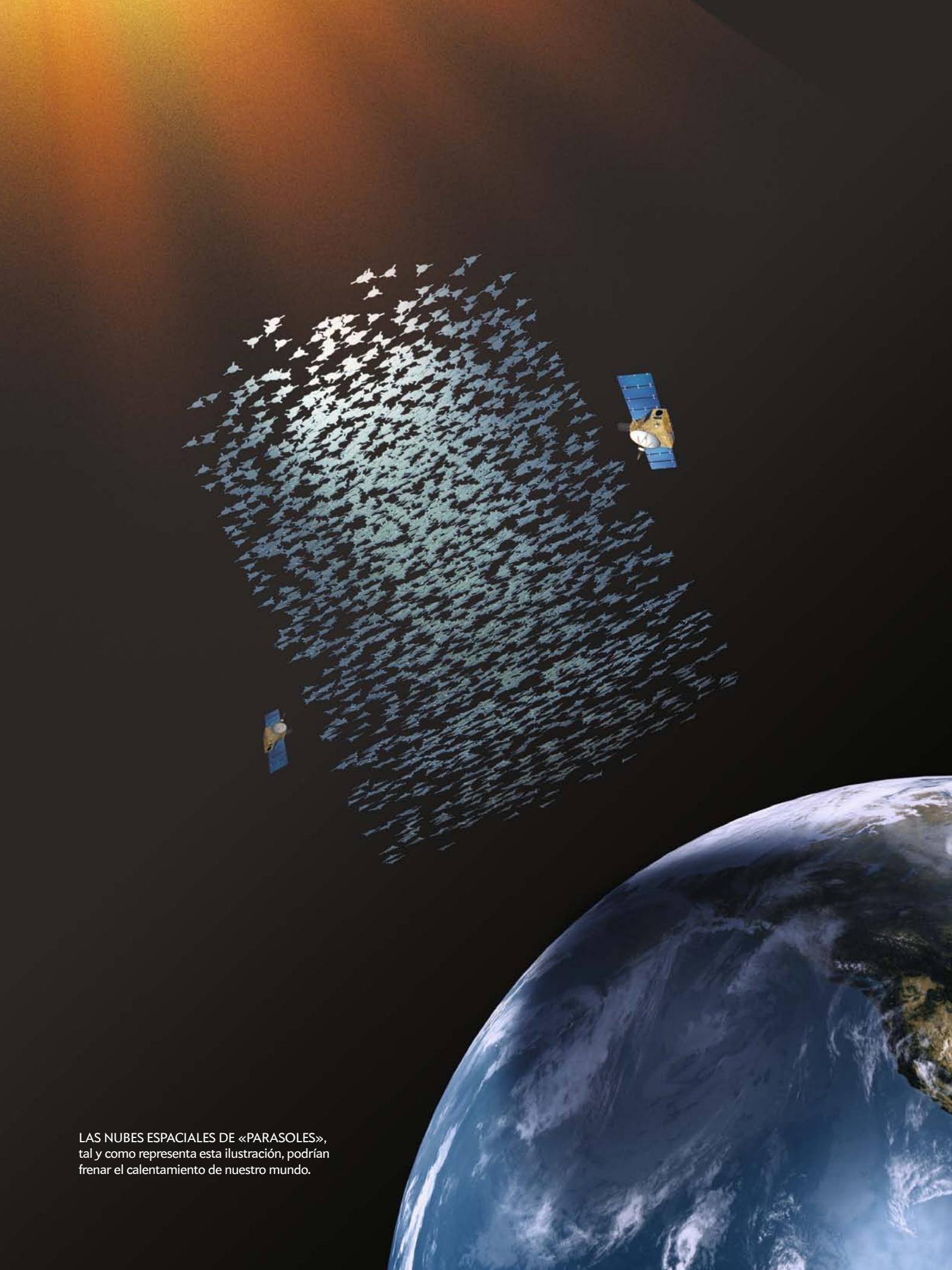
Y en tercer lugar está la gran repercusión que tuvo en 2006 un artículo publicado en la revista *Climatic Change*, donde Paul J. Crutzen pedía que se tomase muy en serio la geoingeniería.

EN SÍNTESIS

Muchos científicos apoyan la investigación en «geoingeniería», las acciones encaminadas a frenar o invertir el calentamiento global sin reducir las emisiones de CO₂.

De las muchas propuestas de ese tipo, las que bloquean la luz solar que llega a la Tierra tendrían el efecto más inmediato. Pero todas presentan inconvenientes y efectos colaterales.

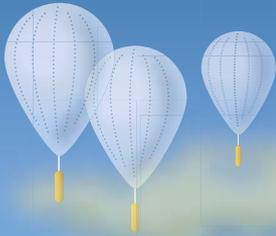
Inyectar dióxido de azufre en la estratosfera, como los volcanes, parece el mecanismo más fiable para bloquear la luz del Sol. Otras propuestas brillantan las nubes sobre los océanos mediante la inyección de sal marina en la atmósfera o proyectan construir una sombrilla en el espacio.



LAS NUBES ESPACIALES DE «PARASOLES»,
tal y como representa esta ilustración, podrían
frenar el calentamiento de nuestro mundo.

Azufre en la estratosfera

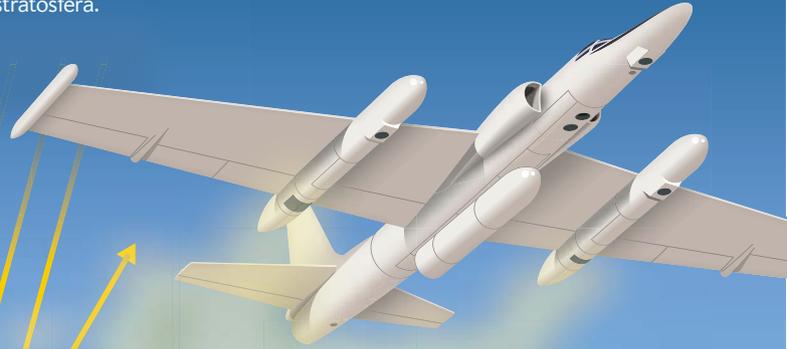
Las erupciones volcánicas enfrían la Tierra al inyectar gas dióxido de azufre (SO_2) en la alta atmósfera. Se ha propuesto que el SO_2 —que ya se emite en grandes cantidades en la baja atmósfera a través de la quema de combustible fósil— podría tener el mismo efecto refrigerante si se pudiera inyectarlo en la estratosfera.



DESPLIEGUE POR GLOBOS

Más ligeros que los aviones, requieren poca energía para elevar la carga de SO_2 a una altura de al menos 10 kilómetros.

Nubes de diminutas gotas de sulfato dispersan la luz



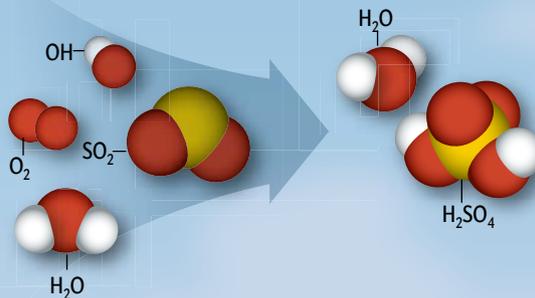
DESPLIEGUE POR AVIONES

Si utilizasen combustible «sucio» rico en azufre, estos aviones podrían diseminar bastante SO_2 por la estratosfera.

ESTRATOSFERA

CÓMO FUNCIONA

Cuando el SO_2 alcanza la estratosfera, se produce una serie de reacciones químicas, en las que participan los radicales de hidroxilo (OH), el oxígeno diatómico (O_2) y agua, bien en forma de vapor, bien condensada en gotas de líquido. Crean partículas de sulfato de alrededor de una micra de diámetro. Las partículas —hechas de ácido sulfúrico (H_2SO_4), agua y trazas de impurezas— desvían parte de la luz solar entrante. El diagrama de abajo muestra algunas de las moléculas que intervienen, pero no se representa ninguna cadena de reacciones químicas.



Erupción volcánica del pasado

DESPLIEGUE POR MISILES

Proyectiles cargados con SO_2 y disparados desde barcos podrían responder rápidamente a las condiciones cambiantes de la alta atmósfera, siempre y cuando se conozcan mejor los detalles de la formación de aerosoles a esas alturas.



«Si la capa de hielo de Groenlandia empezara a desintegrarse mañana, y usted fuese el presidente de EE.UU., ¿qué haría?»

—Daniel P. Schrag,
Universidad de Harvard

INCONVENIENTES

- CAMBIOS IMPREDECIBLES en los vientos locales y en los patrones de las lluvias.
- MENOR EVAPORACIÓN, reducción de la lluvia global.
- AUMENTO DE LA LLUVIA ÁCIDA, contaminando posiblemente ecosistemas aún intactos.
- DESTRUCCIÓN ACELERADA de la capa de ozono, incrementando la incidencia de cáncer de piel.
- COMO NO ES MUY CARO, podría hacerse de forma unilateral, sin acuerdos internacionales, con el aumento consiguiente de la tensión mundial.
- REQUIERE UN MANTENIMIENTO CONTINUADO; la Tierra se calentaría aún más deprisa si se descuidara el mantenimiento y las emisiones de carbono siguiesen en aumento.

Crutzen recibió el premio Nobel de Química en 1995 por sus trabajos sobre la destrucción del ozono atmosférico.

En noviembre de 2007, a Keith y a Daniel P. Schrag, de la Universidad de Harvard, no les costó convencer a climatólogos de renombre para que compartiesen con geoingenieros un congreso en Cambridge, Massachusetts. Los allí reunidos llegaron a la conclusión de que había que investigar más: algunos, porque la geoingeniería realmente les apasionaba; otros, porque la consideraban el mal menor; y aún otros, porque querían darle la puntilla. Pero todos concordaban en que no podía prescindirse de la geoingeniería.

Las soluciones que ofrece la geoingeniería se agrupan en dos categorías, con el objetivo común de reajustar la temperatura de la Tierra. Una categoría quiere controlar la cantidad de luz solar —o de energía solar, para ser más precisos— que alcanza la superficie terrestre; la otra, el calor que se disipa hacia el espacio, que depende en medida apreciable de cuánto CO₂ haya en la atmósfera. Las soluciones que intentan retirar CO₂ de la atmósfera, por ejemplo fertilizando los océanos con hierro, atacarían el problema cerca de su raíz. Pero se necesitarían docenas de años para notar su efecto. Por el contrario, una sombrilla pararía el calentamiento global de forma inmediata, aunque solo durante el tiempo en que siguiese abierta. La idea de la sombrilla responde a la extrema urgencia que algunos científicos le atribuyen al problema climático. «Si la capa de hielo de Groenlandia empezara a desintegrarse mañana y usted fuese el presidente de los EE.UU., ¿qué haría?», pregunta Schrag. «No hay otra opción».

Hasta ahora, sin embargo, se ha investigado poco cualquiera de las soluciones, con sus efectos secundarios, quizás impredecibles. «Se habla mucho más de lo que se trabaja», asegura Caldeira. «Las investigaciones son en su mayor parte incipientes». Algunas ideas no son más que eso, ideas; la dispersión de partículas reflectantes por una gran extensión de los océanos los contaminaría; además, sería bastante probable que las partículas se depositasen en las playas enseguida. Pero no resulta tan fácil descartar otras ideas.

Como no lo es desechar el razonamiento en que se fundamenta la geoingeniería. Muy pocos sugieren que bloquear parte de la luz del Sol pueda sustituir a la supresión del aumento del CO₂ atmosférico o que la geoingeniería puede arreglar el problema del CO₂ por sí sola. Se trataría más bien de ganar tiempo, antes de que se produzca la revolución de que no se añada más carbono neto a la atmósfera. Así, Tom M. L. Wigley, del Centro Nacional para la Investigación Atmosférica (NCAR), aboga por tener en cuenta la geoingeniería porque no cree que vayamos a

salvar el planeta con los planes de reducción de emisiones que hay sobre la mesa: «Nadie se toma en serio la magnitud del problema técnico.»

PARTÍCULAS EN LA ESTRATOSFERA

El tipo de geoingeniería que Crutzen y Wigley defienden es el más económico y el que más posibilidades tendría de funcionar. Lo concibió en 1974 Mikhail I. Budyko, por entonces del Observatorio Geofísico de Leningrado. Consiste en inyectar varios millones de toneladas de dióxido de azufre (SO₂) en la estratosfera. Allí reaccionaría con el oxígeno, el agua y otras moléculas para formar gotitas de sulfato hechas de agua, ácido sulfúrico (H₂SO₄) y otras partículas de polvo y sales sobre las que se condensarían el ácido y el agua. Las nubes de estas diminutas gotas de sulfato dispersarían la luz solar: los atardeceres serían más rojos, el cielo más pálido y la superficie de la Tierra, en promedio, más fría. Nadie lo niega. En 1991 la erupción volcánica de Monte Pinatubo en las Filipinas introdujo unos 20 millones de toneladas de SO₂ en la estratosfera y, efectivamente, sucedió todo eso. La Tierra se enfrió alrededor de medio grado durante un año. Como dice Caldeira, que trabajaba ya en la idea casi diez años antes de que Crutzen le diese publicidad, fue toda una prueba de que el método funciona.

Para cuando Crutzen entró en escena, el mundo se mostraba más dispuesto a tomar en cuenta la geoingeniería: desde el artículo de Budyko, la temperatura había subido medio grado y se había perdido mucho hielo. Aunque Edward Teller y sus colaboradores, del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore, apuntaron en los años noventa que las partículas metálicas sobrevivirían más tiempo y reflejarían más luz solar, Crutzen se aferró a la idea de inyectar SO₂.

Con la quema de los combustibles fósiles, recordó, ya se inyectan todos los años 55 millones de toneladas de SO₂ en la baja atmósfera (a la vez que ocho mil millones de toneladas de CO₂). De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, la concentración final de SO₂ mata medio millón de personas al año. También enfría el planeta, aunque se ignora cuánto. En el momento en que los gobiernos obligan a cumplir las leyes contra la contaminación, por ejemplo la ley de Aire Limpio de los EE.UU., se agrava el calentamiento global. ¿No tendría más sentido, objetaba Crutzen, subir SO₂ hasta la estratosfera? Allí arriba nos protegería del Sol, sin matarnos.

Budyko proponía enviar aviones a la estratosfera que quemaran combustible rico en azufre. Crutzen postulaba distribuir el SO₂ con globos. Las estimaciones de cuánto SO₂ se necesita para contrarrestar el doble del CO₂ preindustrial atmosférico varían. Wigley estimó una cantidad (que suele referirse solo al peso del azufre) de unos cinco millones de toneladas al año; Crutzen

Neblina marina en la troposfera

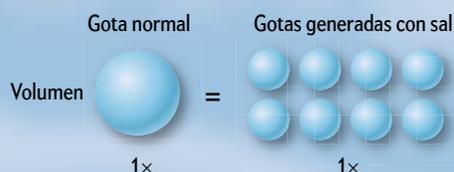
El agua del mar inyectada en el aire se evapora según asciende; cuando llega a los 300 metros apenas si queda algo más que cristales de sal. Esos cristales podrían abrillantar las nubes que se forman a tales altitudes y reflejar más luz solar hacia el espacio.

DESPLIEGUE

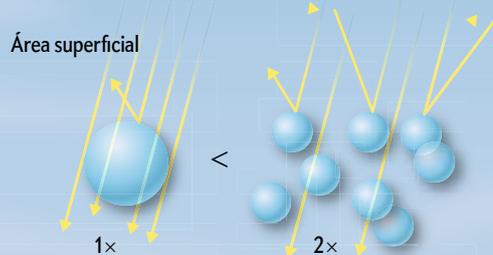
Barcos Flettner sin tripulación, guiados por satélite, surcarían los océanos; mientras, expelerían una bruma de agua de mar hacia el cielo por medio de unos rotores verticales. Turbinas movidas por el desplazamiento del barco a través del agua generarían la electricidad necesaria para impulsar los rotores, que actuarían como las velas: al girar a favor del viento en uno de sus lados y contra el viento en el otro se generaría un impulso ascensional.

CÓMO FUNCIONA

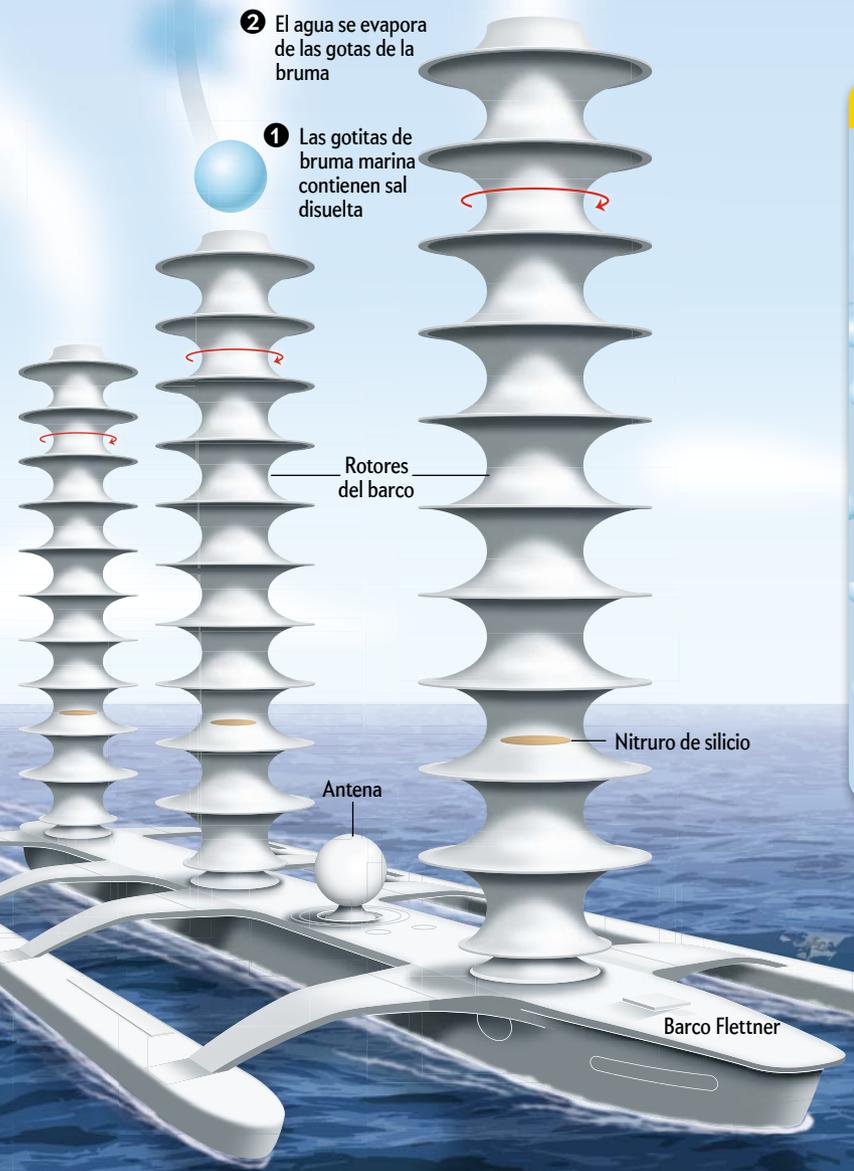
Ascendiendo por el aire frío y húmedo de los océanos, la neblina se sumaría a la densidad de partículas sobre las que el vapor de agua se puede condensar, o nuclear, formando diminutas gotas (*derecha*). Para una cantidad determinada de condensado líquido (que depende solo de la temperatura y humedad del aire), a mayor densidad de nucleación de partículas en suspensión menor será el tamaño de las gotas en las nubes y mayor la superficie total: ocho gotas pequeñas, por ejemplo, ocupan el mismo volumen, pero el doble de superficie, que una gota con un diámetro dos veces mayor.



La mayor superficie de las gotas pequeñas produce una mayor reflexión hacia el espacio de la luz solar entrante; por esa razón, las nubes que forman serían más brillantes y se enfriaría la superficie de los océanos que tuviesen debajo.



- 1 Las gotitas de bruma marina contienen sal disuelta
- 2 El agua se evapora de las gotas de la bruma
- 3 Se precipitan los cristales de sal
- 4 Se condensa el vapor de agua alrededor de las partículas de polvo y de los cristales de sal añadidos
- 5 Las gotas de agua que forman nubes siguen siendo pequeñas



0,8 micras

Una capa de silicio en cada uno de los cilindros giratorios actuaría como una ducha invertida (vista lateral a la derecha); dispersaría el agua de mar hacia el cielo en forma de bruma.

Construir turbinas eólicas y plantas de energía solar sería quizá más sencillo que instalar un quitasol espacial, que costaría más o menos 5 billones de dólares

y Philip J. Rasch, del NCAR, han calculado que bastarían millón y medio de toneladas, siempre que las partículas fuesen más pequeñas en promedio que las de los volcanes, que no llegan a las 0,2 micras de diámetro.

Todos estos montos son muy pequeños, comparados con la cantidad de SO_2 que ya hemos puesto en la baja atmósfera y, dada la escala del problema del CO_2 , nada grandes. La cantidad anual necesaria, señala Caldeira, viene a ser la que arrojaría una manguera de bomberos. Crutzen calculó que su solución costaría unos 25.000 millones de dólares al año, que, distribuidos entre los habitantes de los países desarrollados, corresponde a unos veinte o treinta euros por cabeza, menos de lo que nos gastamos en lotería. A cambio, el resultado sería mucho mejor para todos: un planeta más frío, al menos a escala global.

TODO CAMBIO CLIMÁTICO ES LOCAL

Aun así, lo que más importa es la pauta de las temperaturas locales. Desde ese punto de vista, según David S. Battisti, de la Universidad de Washington, el bloqueador solar SO_2 y el calentador CO_2 no crean una buena combinación. El CO_2 calienta el planeta durante el día y la noche, el invierno y el verano. A medida que el hielo se derrite en los mares y en la tierra, y a los paisajes blancos y fríos suceden otros más calientes y oscuros, el calentamiento por CO_2 se va amplificando cerca de los polos. Por el contrario, una sombrilla estratosférica de sulfato bloquearía el Sol solo donde y cuando el astro brille; no tendría ningún efecto durante el invierno polar. Se supone que enfriaría los trópicos más que los polos, justo lo contrario de lo que se necesita para restablecer el estado preindustrial del clima.

Sorprendentemente, las pocas simulaciones disponibles hasta la fecha sugieren que los efectos de un quitasol de sulfato no son tan simples. Según Caldeira, demuestran más bien que resultaría bastante eficaz a la hora de invertir la tendencia a calentarse del clima global. Como enfriaría los polos lo bastante durante el verano para que el mar se mantuviese congelado, la sombrilla provocaría la misma poderosa retroalimentación que el calentamiento por CO_2 , pero al revés.

Sin embargo, el quitasol de sulfato podría tener importantes inconvenientes en otros aspectos. El SO_2 , al igual que el CO_2 , afectaría no solo a la temperatura del planeta; también podría cambiar los vientos y las precipitaciones de una manera impredecible. Si llegase menos luz solar a la superficie terrestre, habría menos evaporación, sobre todo en los trópicos, lo que haría que las lluvias y el

agua dulce escasearan. Parece que así ocurrió cuando la erupción del Pinatubo: según un análisis realizado por Kevin E. Trenberth y Aiguo Dai, ambos del NCAR, la precipitación total sobre la superficie y la corriente fluvial se redujeron drásticamente durante el año siguiente a la erupción. Mas, al propio tiempo, una menor evaporación produce suelos más húmedos. Y los modelos de Caldeira arrojan que añadir SO_2 a la atmósfera a la vez que CO_2 provoca menos cambios en las precipitaciones que cuando solo se añade CO_2 ; en resumen, la geoingeniería todavía representaría una mejora frente a otras soluciones.

Llovería menos o no, lo probable es que con millones de toneladas de ácido sulfúrico añadidas a la estratosfera las precipitaciones fuesen más ácidas. Globalmente, el aumento de la acidez sería pequeño —puesto que ya estamos poniendo mucho SO_2 en la baja atmósfera—, pero, tal y como Alan Robock, de la Universidad Rutgers, ha señalado en el «Boletín de los Científicos Atómicos», algo de lluvia ácida caería sobre áreas que hasta ahora se habían librado de ella.

¿REGRESO DEL AGUJERO DE OZONO?

Aún inquieta más lo que pasaría con el ozono estratosférico. Los átomos de cloro que alcanzan la alta atmósfera —herencia de los halocarburos que durante bastante tiempo se usaron como refrigerantes y propulsores de los pulverizadores— excavan un agujero en la capa de ozono de la Antártida todas las primaveras, un agujero que la radiación ultravioleta (UV) solar puede atravesar. Las reacciones químicas que destruyen el ozono, sin embargo, suceden solo por debajo de cierta temperatura umbral y en la superficie de las partículas estratosféricas, entre ellas las diminutas gotas de ácido sulfúrico. Tras la regulación de los halocarburos en el protocolo de Montreal de 1987, el agujero de ozono se está haciendo cada vez más pequeño y somero. Pero si se añade más ácido sulfúrico a la estratosfera, hará de catalizador y retrasará la desaparición del agujero.

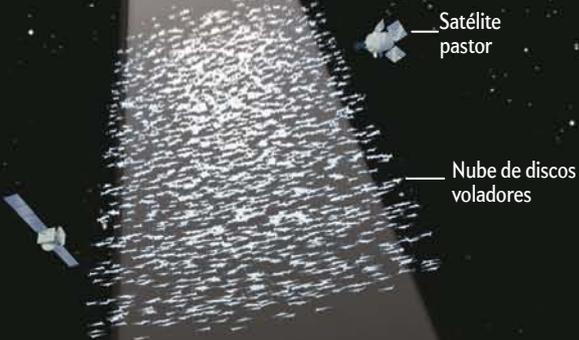
El «experimento» del Pinatubo causó pérdidas de ozono, aunque irrelevantes. Pero de acuerdo con Simone Tilmes, del NCAR, la insignificancia del efecto observado no sirve de orientación, ya que el invierno que siguió a la erupción fue bastante suave. En un invierno más frío, asegura Tilmes, la destrucción del ozono en los polos habría sido mucho mayor. Y peor aún para el ozono: los gases de invernadero causantes del calentamiento global tenderían a bajar más la temperatura de la estratosfera porque atraparían el calor más cerca de la superficie.

INCONVENIENTES

- **CAMBIOS IMPREDECIBLES** en las temperaturas locales, quizá mayores olas de frío y calor.
- **MAYOR LONGEVIDAD** de las nubes hechas con gotas más pequeñas; llovería menos.
- **LA MAGNITUD** del abrigamiento no se conoce bien.
- **EFFECTO NO PRUBADO**; no se ha hecho ninguna prueba de campo de esta idea.
- **COMO NO ES MUY CARO**, podría hacerse de forma unilateral, sin acuerdos internacionales, lo que podría aumentar la tensión mundial.
- **REQUIERE UN MANTENIMIENTO CONTINUADO**; la Tierra se calentaría aún más deprisa si se descuidara el mantenimiento y las emisiones de carbono siguiesen en aumento.

Billones de discos en el espacio

Billones de artefactos voladores con forma de disco y algo más de medio metro de diámetro colocados en una órbita solar estacionaria darían sombra suficiente para enfriar la Tierra. La construcción de una sombrilla espacial evitaría que se tuviese que manipular la atmósfera terrestre.

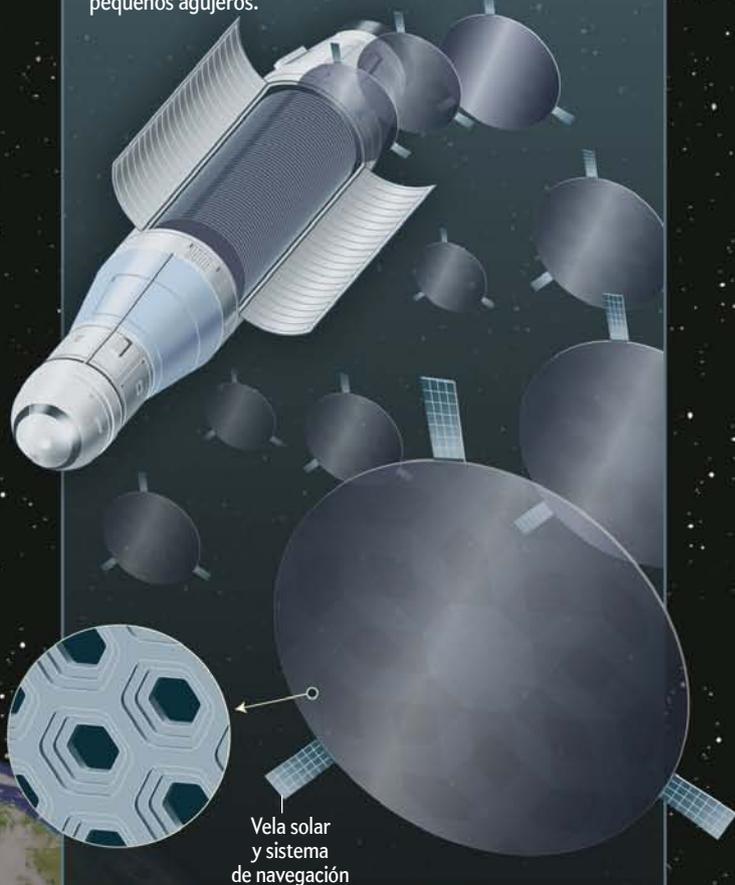


DESPLIEGUE

Los discos voladores, cada uno equipado con un sistema de navegación a bordo, se apilarían en cilindros de un millón de discos. Se los lanzaría al espacio por medio de cañones de bobina electromagnética al ritmo de un cilindro por minuto durante 30 años. El peso total de los cilindros no debe llegar a los 20 millones de toneladas. Los discos voladores se esparcirían (*derecha*) para formar una nube (*arriba*) de 100.000 kilómetros de longitud y 7000 de diámetro, aparcada a un millón y medio de kilómetros de la Tierra, en el «punto de Lagrange 1» (L1), donde se igualan las gravedades del Sol y la Tierra.

CÓMO FUNCIONA

Una vez los discos hubiesen alcanzado la nube en el punto L1, se guiarían por sí mismos, gracias a unos espejos que les servirían de velas para el viento solar, hacia las posiciones indicadas por los satélites pastores. Cada disco volador, con un grosor cuarenta veces inferior al del plástico de envolver comida y con un peso de no más de un gramo, estaría acorazado por miles de pequeños agujeros.



Los rayos de luz solar que pasasen por los agujeros de los discos interferirán destructivamente con los rayos que se hubieran frenado al atravesar el disco donde no estuviese agujereado (*derecha*). Así se reduciría la radiación total que llegaría a la Tierra.



Si no se redujesen las emisiones de carbono y en algún momento fallase la sombrilla refrigerante, las temperaturas ascenderían tan deprisa que un científico ha definido lo que pasaría entonces como la «Caída de Roma»

INCONVENIENTES

- EL COSTE ESTIMADO, 5 billones de dólares, que podrían emplearse en energías alternativas.
- SE NECESITA MUCHO TIEMPO PARA SU CONSTRUCCIÓN, demasiado para una intervención urgente.
- CAMBIOS IMPREDECIBLES en los vientos locales y patrones de lluvias.
- MENOR EVAPORACIÓN, reducción de la lluvia global.
- RECAMBIO DE LOS «DISCOS VOLADORES» a los 50 años; la Tierra se calentaría muy deprisa si el recambio se retrasase y las emisiones de carbono siguieran en aumento.
- DIFICULTAD a la hora de explicar que la nube de discos no se utilizaría como arma para cambiar la cantidad de luz solar que incide en las distintas regiones de la Tierra.

Según los cálculos de Tilmès, si comenzáramos a inyectar SO_2 en la estratosfera en los próximos años, la desaparición del agujero de ozono de la Antártida se retrasaría entre 30 y 70 años. En los años más fríos aparecería también un agujero de ozono en las altas latitudes del norte; bañaría las ciudades de la zona con radiación ultravioleta cancerígena. Rasch señala, no obstante, que los resultados de Tilmès representan «el peor de los casos posibles»: combinó la cantidad de SO_2 necesaria para contrarrestar, de aquí a unos decenios, una cantidad duplicada de CO_2 atmosférico con la cantidad de cloruro que hay ahora en la estratosfera; sin embargo, el cloruro está disminuyendo sin cesar.

El efecto del SO_2 sobre el ozono sigue siendo incierto, como lo es cualquier aspecto de la geoingeniería del sulfato. Podríamos empezar a experimentar el año que viene, pero sería a ciegas: no sabríamos qué estaríamos haciendo, como tampoco lo sabíamos en lo que se refería a la capa de ozono cuando empezamos a emplear los halocarburos en los refrigeradores y en los desodorantes. Crutzen reconoce la ley de las consecuencias inintencionadas en su ensayo: «No debemos infravalorar las probabilidades de obtener efectos climáticos inesperados, tal y como lo prueba el repentino e impredecible desarrollo del agujero de ozono en la Antártida».

BRUMA MARINA EN LA TROPOSFERA

En la baja atmósfera, el SO_2 no solo dispersa la luz solar y provoca enfermedades respiratorias: crea nubes donde no las había y abriga las que haya. Es el llamado «efecto indirecto del aerosol». Los climatólogos creen que este efecto enfría el planeta tanto como la dispersión directa producida por las partículas de los vaporizadores. Las nubes lineales creadas por los gases de escape de los barcos ilustran el fenómeno: persisten durante días y, a medida que los barcos que las emiten van avanzando, se extienden a lo largo de cientos de kilómetros. Las fotografías de los satélites registran la luz solar que reflejan hacia el espacio.

La idea de John Latham para enfriar al planeta consiste en blanquear las nubes marinas ya formadas por medio de nubes de barco, aunque más limpias. Este físico, experto en nubes, opina que podría lograrse el efecto deseado esparciendo gotas microscópicas de agua marina en el cielo por medio de una flota de embarcaciones autónomas e impulsadas por el viento.

El mecanismo básico del efecto indirecto del aerosol es bastante simple. La cantidad de luz solar reflejada por la nube depende de la

superficie de las gotas de agua que la componen. Si en lugar de unas pocas gotas grandes tuviéramos muchas pequeñas, para una misma cantidad de agua (condensada en gotitas de la fase desde la fase de vapor) la superficie sería mucho mayor. En principio, la inyección de partículas en la atmósfera hace que haya más gotas, aunque más pequeñas, y, por tanto, nubes más blancas y reflectantes.

Hoy día, el aire sobre tierra firme está cargado de partículas creadas por la acción del hombre. Se cree que las nubes son ahora más blanquecinas y reflectantes. Sobre los mares, el aire contiene principalmente partículas naturales. Entre ellas, las gotitas de agua de mar suministradas por la espuma de las olas. Cuando llegan a los 300 metros de altitud, la mayor parte del agua se ha evaporado; quedan solo partículas de sal. Mas, a esa altitud comienza de nuevo la condensación del vapor de agua alrededor de las partículas. Las nuevas gotas forman los bajos estratocúmulos marinos que cubren alrededor de una cuarta parte de los océanos terrestres. Latham sugiere abrillantar estas nubes añadiéndoles rociadas de sales suspendidas en el aire que cuadruplican el número de gotas de agua de las nubes.

Stephen Salter, de la Universidad de Edimburgo, ha propuesto una manera de ejecutar la idea de Latham que sobre el papel parece muy ingeniosa. Una regadera, la llama Latham, pero con una boquilla de silicio acribillada por miles de millones de agujeros de menos de una micra de diámetro, montada en un barco autónomo y gobernado por satélite. Más específicamente, se trataría de un barco Flettner o barco de rotores, con altos cilindros giratorios, parecidos a chimeneas, que harían de velas y provocarían un impulso ascensional, porque, por un lado, girarían a favor del viento y, por otro, contra el viento.

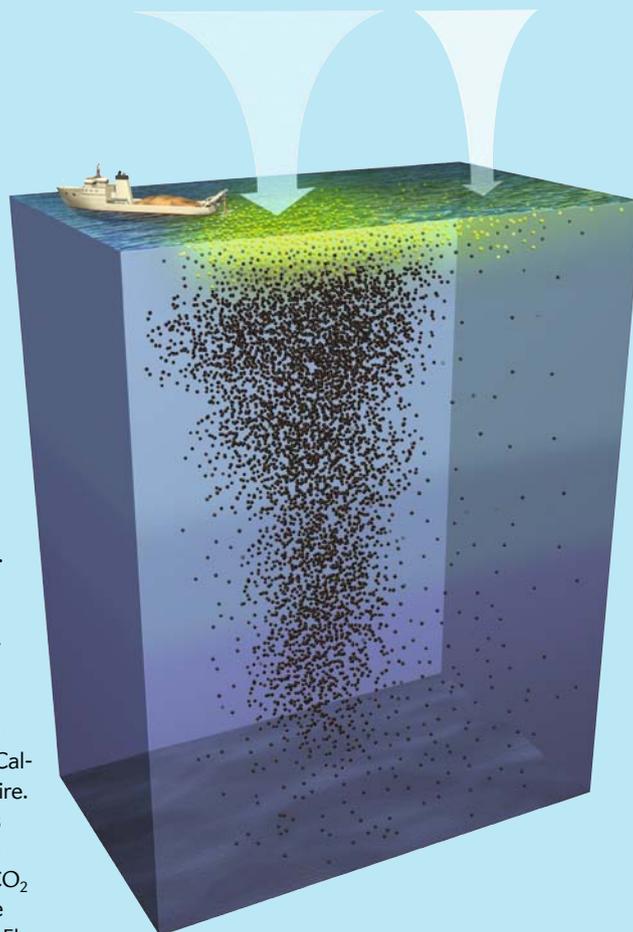
En el método de Salter, unas turbinas, impulsadas por el agua que se movería con respecto al barco, generarían la electricidad necesaria para mantener el giro de los cilindros y dispersar agua salada en forma de gotitas de 0,8 micras. Salter y Latham calculan que 1500 barcos —a un coste la unidad de 2 millones de dólares, con un total de 3000 millones de dólares—, cada uno de los cuales expeliese unos 30 litros por segundo, compensarían el calentamiento global causado por el doble del CO_2 preindustrial. Se podría alcanzar la mitad del objetivo, según los resultados de los cálculos de la Oficina del Centro Hadley para la Investigación y Predicción del Clima en Exeter, desplegando los barcos solo en un 4 por ciento de la extensión de los océanos.

Confinamiento del carbono

Una forma de extraer el carbono de la atmósfera consiste en aumentar el crecimiento del plancton, por ejemplo inyectando hierro, un micronutriente, en las partes del mar donde haya poco. La floración de nuevo plancton atraería el dióxido de carbono (CO_2) del aire. Lo que se desconoce, tras una docena de pruebas de la fertilización férrica, es la cantidad de carbono captado por la materia orgánica que permanecería fuera de la atmósfera o cuáles son los efectos colaterales que tal manipulación tendría sobre el ecosistema marino.

Otro mecanismo, propuesto más recientemente por Kurt Zenz House y sus colaboradores, de la Universidad de Harvard, consiste en hacer que el agua del mar sea más alcalina. House propone descomponer la sal —el cloruro sódico— del mar para que el cloro y el sodio reaccionen con el agua marina y se creen hidróxido de sodio y ácido clorhídrico. El ácido se almacenaría en tierra y el hidróxido permanecería en el océano. Esto haría que se disolviera en el agua una cantidad mayor de CO_2 sin acidular más el océano. En última instancia, House afirma que el carbono acabaría en forma de carbonato cálcico en el fondo del mar. Pero la construcción de las plantas para el tratamiento del agua marina sería muy costosa; se necesitarían cien grandes plantas para absorber una décima parte del CO_2 generado al año por la humanidad.

Quizá la alternativa más prometedora es la concebida por Klaus S. Lackner, de la Universidad de Columbia, y David W. Keith, de la Universidad de Calgary en Alberta: construir depuradoras terrestres que capturen el CO_2 del aire. Lackner y su colaborador, Allen B. Wright, de Global Research Technologies (GRT), de Tucson, han elaborado un plástico, sujeto a patente, que atrapa el CO_2 atmosférico como un papel atrapamoscas. Cuando el plástico rico en CO_2 se enjuaga con vapor de agua se produce una corriente de CO_2 puro, que se podría soterrar, si no convertirse de nuevo en un hidrocarburo combustible. El gran inconveniente es, también en este caso, el coste, pero se podría empezar a pequeña escala: GRT se dispone a vender sus primeras unidades a los invernaderos en los dos próximos años porque emplean CO_2 para enriquecer la atmósfera de sus plantas.



Sin embargo, no se ha calculado hasta qué punto sería uniforme el enfriamiento en todo el planeta. Battisti teme que acabara creándose un mundo con puntos muy fríos y puntos muy calientes. Los barcos «pulverizadores» dan, además, otro motivo de preocupación; las nubes hechas de muchas gotas pequeñas son más duraderas, lo que resulta ideal para la sombrilla solar, aunque perjudicial para la producción de lluvia.

Finalmente, se desconoce en qué cuantía las nubes brillarían más. Los modelos climatológicos actuales sobreestiman el efecto; los aerosoles que ahora están en la atmósfera deberían bastar para cancelar el calentamiento global, lo que no ocurre. Rasch acaba de empezar a modelar la idea de Latham. Se trata de un aspecto del clima que entendemos muy mal, asegura.

No obstante, en comparación con otras propuestas de geoingeniería, la inyección de agua salada en el aire por barcos llevados por el viento parece benigna. Si algo saliera mal, afirma Latham, se puede eliminar la inyección en cuestión de días o, a lo sumo, en unas semanas, mientras que el ácido sulfúrico permanecería en la estratosfera durante años. Pero solo un experimento de campo puede responder algunas preguntas. Hasta ahora Latham ha recibido la ayuda únicamente del Canal Discovery. Con vistas a la producción de un documental sobre geoingeniería, los productores de ese canal

de televisión han financiado la construcción de un pequeño barco Flettner.

EL QUITASOL EN EL ESPACIO

El Canal Discovery también ha costeado la construcción de un disco de alrededor de un centímetro de diámetro, una cerámica de nitruro de silicio. Es transparente y está salpicado de agujeros diminutos. Tiene un espesor de alrededor de un cuarto de micra, la cuadragésima parte del grosor de las películas de plástico de envolver comida, pero es mucho más rígido que estas. Se trata de una idea de J. Roger P. Angel, director del Laboratorio de Espejos del Observatorio Steward, de la Universidad de Arizona. Su fama de innovador en el campo de los espejos y óptica para telescopios concuerda con que haya ideado semejante aparato óptico discoidal, hecho del mismo material que los cojinetes de alto rendimiento para automoción.

Hace un par de años, para paliar el cambio climático, retomó una vieja, y heterodoxa, propuesta de geoingeniería: colocar una sombrilla en L1, el punto interior de Lagrange, a millón y medio de kilómetros de la Tierra en dirección al Sol. (En los puntos de Lagrange el Sol ejerce la misma atracción gravitatoria que la Tierra.) Desde L1, el quitasol proyectaría una sombra uniforme sobre el planeta sin contaminar su atmósfera.

En la formulación de Angel, la sombrilla espacial no constaría solo de un satélite, sino de billones; cada uno, un disco de nitruro de silicio de medio metro de ancho que no pesaría más de un gramo, con su ordenador y sistema de navegación. (Las mariposas monarca, señala Angel, pesan menos de un gramo y vuelan miles de kilómetros hasta su lugar de reproducción en México.) Unos cañones de bobina electromagnética lanzarían los discos de millón en millón. Estos impulsores medirían kilómetro y pico de largo y estarían en su mayor parte enterrados. Los lanzamientos se espaciaban un minuto, más o menos, a lo largo de treinta y tantos años. Por lo tanto, la sombrilla espacial al final no llegaría a pesar 20 millones de toneladas, algo menos de 70.000 veces la masa actual de la Estación Espacial Internacional. No es grano de anís trasladar tanta masa a los cielos.

Motores de propulsión iónica muy eficientes transportarían esos grupos desde la Tierra hasta la órbita del punto L1. Allí se esparcirían los discos en una nube de cien mil kilómetros de largo que apuntaría hacia el Sol. Unos satélites «pastores» patrullarían la nube para establecer un sistema local de posicionamiento; los discos evitarían salirse de la estructura con la ayuda de unos pequeños espejos que harían las veces de velas solares. Los fotones solares atravesarían el transparente nitruro de silicio de los discos, pero los que pasasen por los agujeros se les adelantarían un poco. Los dos conjuntos de fotones interferirían destructivamente, con lo que disminuiría la luz que llegaría a la Tierra y se dispersaría un dos por ciento del total a cada lado del planeta.

Resulta difícil saber si Angel se toma en serio su propia idea. Reconoce que no se trataría de una solución económica o rápida. Se calcula que costaría 5 billones de dólares, lo que, según Wigley, la descarta. Requeriría tanto esfuerzo, razona Caldeira, que, para eso, valdría más construir turbinas eólicas y plantas de energía solar. Angel está de acuerdo; emplea la mayor parte de su tiempo en desarrollar métodos que concentren la luz solar, con el objetivo final de que las células fotovoltaicas sean más eficientes. Al fin y al cabo, cualquier sombrilla desperdiciaría la luz del Sol.

LO INTELIGENTE Y LO ESTÚPIDO

La geoingeniería no puede resolver el problema del CO₂, en parte porque este no se reduce al calentamiento global. Si nos limitáramos a frenar el calentamiento global con un quitasol, el CO₂ seguiría fluyendo hacia los océanos, incrementaría su acidez poco a poco y con el tiempo habría consecuencias ecológicas nefastas. No obstante, parar el calentamiento global aunque solo sea temporalmente merece la pena. Y la geoingeniería de los sulfatos, dice Caldeira, podría ser lo bastante barata para que algunos intentasen llevarla a cabo y corriesen con los gastos. Los EE.UU. podrían escoger salvar la capa de hielo de Groenlandia (y, por tanto, prevenir la inundación de Florida); China, los glaciares del Himalaya; Suiza, su industria del esquí. Y todo ello, sin preocuparse de negociar un tratado mundial del clima. Según se mire, esta es una de las caras más atractivas o más temibles de la geoingeniería.

Quizá lo más inquietante sea pensar en qué ocurriría si no redujésemos las emisiones de carbono, construyésemos una sombrilla y termináramos por dejar que se perdiese. Raymond T. Pierrehumbert, de la Universidad de Chicago, llama a esta situación «mundo de Damocles». Habría que mantener el fino

hilo de sulfato que sostendría la espada de CO₂ año tras año con inyecciones cada vez mayores de SO₂. Si alguna vez se suspendiera ese mantenimiento, por guerras, desórdenes sociales o crisis económicas, la cantidad acumulada de CO₂ calentaría el planeta de un tirón y ocurriría precisamente lo que se pretendía evitar, solo que peor.

Caldeira y H. Damon Matthews, de la Universidad Concordia de Montreal, han modelado también qué pasaría si un quitasol que desapareciese; encontraron que la Tierra se calentaría a un ritmo de 2 a 3,5 grados por decenio, diez veces más rápido que hoy en día. La historia de la Humanidad, argumenta Pierrehumbert, no inspira confianza en que fuéramos capaces de lidiar con una catástrofe de tal magnitud. En la gráfica de que se vale para ilustrar el resultado de su propia simulación, al punto que corresponde a la interrupción de la geoingeniería con la consiguiente subida de la temperatura lo denomina «Caída de Roma».

Ignoramos si la geoingeniería tendrá sentido algún día. La mayoría está de acuerdo en que ya no se puede prescindir de investigar en ese campo, pero las actitudes son muy variadas. Para algunos, como Wigley, un quitasol representa una estrategia racional para ganar tiempo, antes de que adoptemos nuestras fuentes de energía para que no liberen más carbono neto a la atmósfera. Otros se temen que la sombrilla postergaría el trabajo que realmente debe afrontarse. «Es muy desafortunado que este genio haya salido de la botella justo cuando el mundo parecía despertarse para encarar el grave problema del cambio climático», comentó hace poco Pierrehumbert en una conferencia impartida en el Instituto Kavli de Física Teórica, de la Universidad de Santa Bárbara en California. «Es un riesgo muy grande que se empiece a considerarla una alternativa, pues esta técnica cortaría de raíz todo lo que ahora se inicia con el fin de reducir de verdad las emisiones».

Al final, el debate enfrenta distintos puntos de vista acerca de la naturaleza humana y del poder de la ciencia de embridarla. Wigley sostiene que sería necio practicar la geoingeniería sin reducir las emisiones: «Llegaríamos al punto de que no hubiese más peces en el mar. No somos tan estúpidos. Podemos guiarnos por la buena ciencia». Pierrehumbert, como muchos otros, lo ve más oscuro. En una de sus transparencias de PowerPoint puede leerse: «Somos muy capaces de hacer estupideces». ■

PARA SABER MÁS

Feasibility of cooling the Earth with a cloud of small spacecraft near the inner lagrange point (L1). Roger Angel en *PNAS*, vol. 103, n.º 46, págs. 17.184-17.189, 14 de noviembre, 2006.

20 reasons why geoengineering may be a bad idea. Alan Robock en *Bulletin of the Atomic Scientists*, vol. 64, n.º 2, págs. 14-18, 59, mayo-junio de 2008.

El artículo de Alan Robock y el debate que le sucedió están disponibles en www.thebulletin.org/web-edition/roundtables/has-the-time-come-geoengineering

El número de septiembre de 2008 de *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, dedicado a la geoingeniería, está disponible en <http://publishing.royalsociety.org/index.cfm?page=1814>

Las disertaciones sobre geoingeniería de David W. Keith, Raymond T. Pierrehumbert, Kurt Zenz House y otros se encuentran disponibles en la página web del Instituto Kavli de Física Teórica: http://online.itp.ucsb.edu/online/climate_c08



LA BIOLOGÍA SINTÉTICA podría constituir una herramienta valiosa para regenerar los ecosistemas amenazados de nuestro planeta y mitigar los efectos del cambio climático.

HACIA UNA BIOINGENIERÍA DEL PLANETA

La aplicación de métodos de biología sintética al diseño de nuevas interacciones ecológicas podría ayudarnos a evitar el colapso ambiental

Ricard V. Solé, Raúl Montañez y Salva Duran-Nebreda

EN SÍNTESIS

Numerosos ecosistemas de nuestro planeta se hallan en un estado muy frágil, a punto de desaparecer, en gran parte como consecuencia de la presión humana y del cambio climático.

Los autores del presente artículo han desarrollado un modelo teórico en el que plantean la posible regeneración de estos hábitats. En concreto, proponen utilizar organismos sintéticos que, al crear nuevas interacciones ecológicas con las especies autóctonas, permitirían llevar al ecosistema a su situación previa al colapso y, desde esta, a un estado estable.

El modelo incluye barreras genéticas y ecológicas que evitan la dispersión incontrolada en la naturaleza de los organismos modificados.

Ricard V. Solé es investigador ICREA en la Universidad Pompeu Fabra (UPF) y miembro del Instituto Santa Fe, en Nuevo México. Sus investigaciones se centran en los orígenes de la complejidad biológica.



Raúl Montañez es miembro del Laboratorio de Sistemas Complejos de la UPF y del Instituto de Biología Evolutiva (UPF-CSIC). Investiga la complejidad biológica y sus mecanismos de regulación y evolución.



Salva Duran-Nebreda, miembro del laboratorio y del instituto de la UPF arriba mencionados, usa la biología sintética y la modelización para investigar los orígenes de la multicelularidad y el desarrollo.



N

UESTRA BIOSFERA HA EXPERIMENTADO A LO LARGO DE SU EXISTENCIA NUMEROSOS CAMBIOS CLIMÁTICOS abruptos y cinco extinciones masivas que han dejado una marca clara en el registro fósil. Una de ellas, la del final del Pérmico, casi provocó la desaparición de la vida en la Tierra, según apunta el paleontólogo Michael Benton, de la Universidad de Bristol. En la actualidad, los datos parecen indicar que nuestro planeta está sufriendo un nuevo proceso de cambio. A medida que las señales de alarma van en aumento, crece la sensación de que la viabilidad de nuestros ecosistemas puede verse seriamente amenazada por el cambio climático y el deterioro ambiental. La temperatura global está ascendiendo a una velocidad cada vez mayor como consecuencia de la acumulación en la atmósfera de gases de efecto invernadero. Las especies invasoras, la caza, la contaminación o la pérdida y fragmentación de hábitats están promoviendo la pérdida irreversible de biodiversidad. El empleo desmedido de combustibles fósiles y la presión que ejercen sobre los ecosistemas la explosión demográfica humana y nuestro modelo de consumo son, en gran medida, responsables de estos cambios. Así pues, todo apunta a que, en esta ocasión, podríamos ser la causa principal de la que se prevé que será la sexta gran extinción.

¿Cómo podemos reaccionar ante esta enorme amenaza? Recientemente, nuestro grupo ha propuesto una posible solución basada en la combinación de la ingeniería ecológica y la biología sintética. En concreto, hemos desarrollado una hipótesis que plantea el uso de organismos sintéticos para hacer frente a los principales retos ambientales de nuestro planeta. Nuestra estrategia conllevaría en particular la creación de nuevas interacciones ecológicas que permitieran mantener o recuperar la estabilidad de comunidades ecológicas frágiles. Con ella podría evitarse el colapso de los ecosistemas degradados, mitigar la acumulación de los gases de efecto invernadero o eliminar contaminantes de distintos hábitats. Nuestro modelo incluye, además, barreras genéticas y ecológicas para impedir la dispersión de los organismos modificados, que serían inviables fuera de las condiciones estrictas para las que se han creado.

Hemos bautizado nuestra idea con el nombre de «terraformación». El concepto, que nació en 1942 en la literatura de ciencia ficción, se propuso más tarde como una forma de modificar el clima de otros planetas, en particular el de Marte. James Lovelock sugirió, por ejemplo, la inyección en el planeta de gases de efecto invernadero, como los clorofluorocarburos, para provocar un aumento de las temperaturas y la liberación del agua congelada en el permafrost marciano. Dado que estas propuestas tienen que ver con crear condiciones similares a las de la Tierra, hablamos de terraformación para referirnos a modificaciones artificiales de hábitats destinadas a favorecer la presencia de sistemas vivos (tal y como los conocemos).

A diferencia de Marte, que puede ser un planeta biológicamente inerte, la terraformación de nuestro planeta consistiría en modificar una biosfera ya existente introduciendo pequeñas variaciones en las interacciones ecológicas con el fin de evitar el

colapso del ecosistema, o al menos paliar alguno de los efectos del cambio climático. Para ello nos apoyamos en dos ideas clave: la primera es que, mediante el conjunto apropiado de genes y mecanismos de regulación, podemos ampliar el fenotipo de algunos microorganismos autóctonos; la segunda se basa en el conocimiento sobre cómo las dinámicas cooperativas entre organismos pueden modificar los flujos de materia y energía a través de las redes ecológicas, lo que favorecerá la construcción de un nicho ecológico estable y promoverá su resiliencia.

PERSPECTIVA ACTUAL

Para hacer frente a las amenazas ambientales, durante las últimas décadas se han desarrollado numerosas ideas (no excluyentes entre sí) que abarcan desde una profunda revisión y cambio de nuestros hábitos de consumo hasta intervenciones activas sobre el clima. La modificación de nuestros hábitos requiere un ajuste profundo del sistema económico actual, el establecimiento de acuerdos internacionales y un cambio social de gran calado, así que parece mucho más fácil apostar por la intervención sobre un problema ambiental dado o sobre sus efectos. En este contexto, hay dos grandes retos, relacionados entre sí, que debemos abordar: reducir las concentraciones de gases de efecto invernadero y preservar la estabilidad de ecosistemas clave cuya diversidad se halla amenazada.

La geoingeniería, basada en el desarrollo de métodos de modificación del clima a escala regional e incluso global, se postula como una posible estrategia de intervenir sobre el clima. En ella se contempla, entre otras opciones, inyectar aerosoles en la estratosfera, crear nubes capaces de reflejar la luz solar o secuestrar el dióxido de carbono en estratos profundos.

Por otra parte, existen técnicas que utilizan sistemas vivos (bacterias, plantas u hongos) seleccionados o diseñados para mejorar el estado de un ecosistema que se ha deteriorado. Estas técnicas se conocen como métodos de biorremediación. Entre sus objetivos figuran la eliminación de contaminantes como los metales pesados (el mercurio) o la degradación de moléculas orgánicas como el tolueno o los vertidos de petróleo en el océano. La biorremediación se basa en la liberación de organismos que pueden o que necesitan emplear las sustancias contaminantes para su crecimiento. De este modo, una vez liberados, proliferarán a expensas de un recurso que es tóxico para otras especies hasta completar el proceso de limpieza.

Aunque ambas formas de abordar daños ambientales resultan relevantes y en la actualidad se hallan en desarrollo, ninguna de ellas, tal y como están concebidas, permite hacer frente a los retos que planteábamos más arriba. La geoingeniería puede mitigar, a largo plazo y con un elevado coste económico, el exceso de dióxido de carbono o metano en la biosfera; pero, mucho antes de alcanzar los niveles deseados, algunos ecosistemas clave colapsarán, junto con las sociedades humanas que dependen de ellos para sobrevivir. Por otra parte, muchos de estos ecosistemas en peligro no están contaminados, sino que precisan una modificación en su organización que va más allá de la simple biorremediación mediante la introducción de un determinado organismo.

Además, la celeridad con la que pueden darse algunos cambios en el futuro hace que debamos afrontar los riesgos sin más demora. Llegar a una solución, y hacerlo a tiempo, tal vez exija un cambio de estrategia, una nueva visión del problema en la que la biología sintética y la ingeniería ecológica se aúnen, para rediseñar nuevos elementos y relaciones que permitan restablecer el correcto funcionamiento de los ecosistemas degradados, de modo que recuperen su productividad y funcionalidad.

TRANSICIONES ABRUPTAS

En las últimas décadas, los estudios sobre la estabilidad de los ecosistemas, tanto terrestres como marinos, han puesto de manifiesto que su respuesta ante las variaciones del entorno puede resultar catastrófica. El Sáhara, que actualmente asociamos a un desierto sin vida, nos ofrece un ejemplo de que este tipo de catástrofes han ocurrido en el pasado y muy probablemente se repetirán en el futuro. Hace algo más de 5500 años la región se hallaba cubierta por vegetación y estaba dominada por ecosistemas ricos en especies. Pero, en menos de un siglo, se deterioró hasta una situación de colapso irreversible, pese a que variables climáticas como la insolación habían ido cambiando de forma modesta.

En teoría ecológica, decimos que estos sistemas son biestables: existen dos estados posibles, muy distintos, separados por una frontera que está definida por un punto crítico. En el caso de la desertificación, el estrés ambiental (asociado a un valor umbral de intensidad de pastoreo o de precipitaciones) es el parámetro clave que determina la transición entre un estado con cubierta vegetal y otro desértico. ¿Cuál es el origen de estos cambios bruscos? Como suele ocurrir en ecología, las

interdependencias entre las especies y sus efectos sobre las variables ambientales están lejos de seguir un esquema lineal, en el que la respuesta es proporcional a la causa. En general, los mecanismos biológicos de modificación del nicho ecológico estabilizan el sistema y lo alejan del estado que, de otro modo, determinarían las variables puramente ambientales. Pero, una vez se superan ciertos límites (puntos críticos), la estabilidad se pierde por completo y el sistema pasa a estar controlado por las variables abióticas.

La ecología de los sistemas biestables se conoce bien, gracias a lo cual se han podido desarrollar modelos que permiten simular o predecir su comportamiento a largo plazo cuando se modifican distintos parámetros. Si empleamos estos modelos para representar el porcentaje de suelo cubierto por plantas a medida que aumenta el estrés sobre el sistema, observamos que la vegetación se va reduciendo lentamente conforme se intensifica el estrés; pero, a partir de cierto nivel de estrés, se produce una caída abrupta y acelerada de la cubierta vegetal hasta su extinción. De darse esta transición, resultaría además irreversible: aunque lográramos restablecer las condiciones anteriores, se necesitaría una reducción muy notable del estrés para posibilitar la vuelta a un estado con vegetación.

Los estudios indican que algunos ecosistemas bien conocidos, entre ellos los de la región del Kalahari y algunos de la cuenca mediterránea, podrían estar mostrando indicios de acercarse a esos puntos críticos. La importancia de los ecosistemas áridos es enorme: constituyen casi el 40 por ciento de la superficie de todos los ecosistemas terrestres y sostienen un porcentaje similar de población humana, que en la mayoría de los casos contribuye a aumentar la presión sobre la cubierta vegetal como consecuencia del pastoreo. Dado lo apremiante de la situación, ¿cómo podemos devolver estos sistemas a unas condiciones que favorezcan su conservación y, a su vez, nuestra supervivencia?



LA ISLA DE ASCENSIÓN ofrece un ejemplo histórico de terraformación. En el pasado desprovista de vegetación, hoy incluye en su zona más alta (Green Mountain) un bosque nuboso. Este puede considerarse un ecosistema «sintético»: la combinación de plantas que coexisten en él no se da en ningún otro lugar y se debe a las especies exóticas elegidas para la reforestación.

Para resolver este problema, es posible que necesitemos formular una nueva aproximación interdisciplinar que incluya introducir modificaciones en la arquitectura de las interacciones entre especies.

EL PRIMER ECOSISTEMA SINTÉTICO

La transformación de los ecosistemas es algo que está ocurriendo de forma constante y generalizada, y ello no solo afecta a la presencia o ausencia de organismos. Tiene también un gran impacto en los procesos de transferencia genética horizontal y en la reorganización de las redes de interacciones entre especies.

Cuando nos planteamos modificar un ecosistema, inmediatamente salta en nosotros una señal de alarma: ¡no podemos poner en peligro la naturaleza! Tendemos a pensar que los ecosistemas que nos rodean son de algún modo «primigenios»; o que tenemos el compromiso de retornarlos a su estado «original» a partir de lo que nos queda de ellos. Muy a menudo no se tiene en cuenta que su organización es ciertamente distinta de la de los ecosistemas que los precedieron, aunque no por ello resulte poco diversa o carente de interés.

Un ejemplo histórico de ingeniería de ecosistemas que resulta interesante y a la vez alentador lo ofrece la isla de Ascensión. Este territorio localizado en medio del Atlántico sufrió una pérdida notable de biodiversidad después de que los marinos portugueses introdujesen cabras en él en el siglo XVI. La degradación llegó a tal punto que, cuando el *Beagle* llegó a Ascensión en 1836, un joven Charles Darwin la describió como «un trozo de ceniza». Impulsado por el botánico Joseph Hooker, se inició a mediados del siglo XIX un programa de introducción de especies foráneas, especialmente árboles, con la hipótesis de que estos ayudarían a atrapar más humedad y permitirían sustentar un ecosistema más diverso. El resultado final del que podríamos llamar el primer ecosistema sintético fue espectacular. Hacia finales del mismo siglo se habían establecido en Ascensión un buen número de especies que jamás antes habían coincidido en un mismo ecosistema (como pinos, bambú y eucaliptos), formando un bosque nuboso tropical. Veinte años después de la intervención, aquella isla en la que era imposible hallar un manantial tenía un aporte de agua excelente. De ello se desprende la importante lección de que los humanos también pueden tener un impacto positivo sobre los ecosistemas y que estos pueden emerger a partir de condiciones totalmente artificiales y formar comunidades complejas. Lo que ocurrió en Ascensión constituye un precedente que nos sirve para ilustrar nuestra idea de la terraformación de la Tierra para evitar un colapso ambiental a gran escala.

El empleo de organismos genéticamente modificados es un tema socialmente controvertido. Su uso se limita actualmente a la agricultura intensiva, con escasas excepciones en otros ámbitos, como la cría del salmón. Por otra parte, diversos estudios han demostrado la eficiencia de utilizar cepas microbianas seleccionadas artificialmente para llevar a cabo tareas de descontaminación, pero los ensayos sobre esta aplicación en campo abierto son aún limitados. ¿Podríamos emplear organismos diseñados para rescatar un ecosistema en peligro de colapso?

POSIBLES CASOS DE TERRAFORMACIÓN

Tomemos como ejemplo la aplicación de la terraformación en los ecosistemas semiáridos, cuyo problema principal es, además del sobrepastoreo, la baja retención de agua en el suelo. En estos hábitats, el sustrato clave responsable de mantener y favorecer la presencia de vegetación es la llamada costra del suelo [véase «Es-

partales ibéricos», por Fernando T. Maestre; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2008]. Esta constituye un complejo ecosistema en el que numerosas especies, como briófitos, líquenes, hongos y bacterias, interactúan entre sí formando una red compleja pero que se muestra frágil ante las actividades humanas. Supongamos ahora que logramos modificar algunas de las especies presentes en estas costras de forma que mejoren la calidad del suelo, ya sea porque segregan alguna molécula higroscópica (capaz de retener agua), o tal vez porque fijan mejor el nitrógeno atmosférico, todo lo cual puede ayudar a otras especies a proliferar. En ambos casos, el objetivo consiste en crear una dependencia mutua entre la cubierta vegetal que queremos preservar y la especie del suelo que modificamos. Esta última llevará a cabo la función mejorada, lo que revertirá en un mayor desarrollo de las plantas, que, a su vez, favorecerán las condiciones del suelo a su alrededor. Estos cambios no tienen por qué ser drásticos (de hecho, puede que las propias limitaciones del medio árido lo impidan), pero basta con que logren mantener la vegetación estabilizada. De ser así, evitarían que el ecosistema alcanzara el punto crítico y su declive hacia el estado desértico.

La biología sintética puede emplearse en hábitats fuertemente transformados por el ser humano. De hecho, la mayoría de los ecosistemas que existen en la actualidad sobre nuestro planeta constituyen ecosistemas noveles que son el resultado de cambios antropogénicos. Al igual que en el ejemplo de la isla de Ascensión, se trata de hábitats en los que, por diferentes causas, se han reunido especies exóticas con especies locales que compiten o cooperan entre sí y que, en conjunto, han creado nuevas comunidades ecológicas.

Suele pensarse en una especie exótica como una contribución negativa a la biología autóctona. Sin embargo, sabemos que algunas especies invasoras han permitido mejorar la estabilidad del ecosistema e incluso favorecer una mayor diversidad. En el extremo de los ecosistemas noveles, hallaríamos los vertederos alrededor de grandes centros urbanos, las explotaciones mineras o los sistemas de alcantarillado, así como las numerosas manchas de plástico marino localizadas en los vórtices oceánicos de todo el planeta.

Los organismos sintéticos podrían desempeñar diversas funciones en los mares contaminados por plásticos. Podrían descomponer estos u otros materiales de difícil degradación (con lo que llevaríamos a cabo un proceso de biorremediación), pero también podrían potenciar directa o indirectamente la fijación de biomasa en el ecosistema o promover la estabilidad de este mediante nuevas interacciones con otras especies (con lo que nos acercaríamos a la geoingeniería). La viabilidad de este escenario parece confirmada por la observación de que, de forma natural, han aparecido cepas de microorganismos que degradan activamente el plástico. Así lo ha demostrado el trabajo de Shosuke Yoshida, del Instituto de Tecnología de Kioto, y sus colaboradores, que han identificado una nueva bacteria, *Ideonella sakaiensis*, que emplea un derivado del poliestireno como fuente básica de carbono y energía.

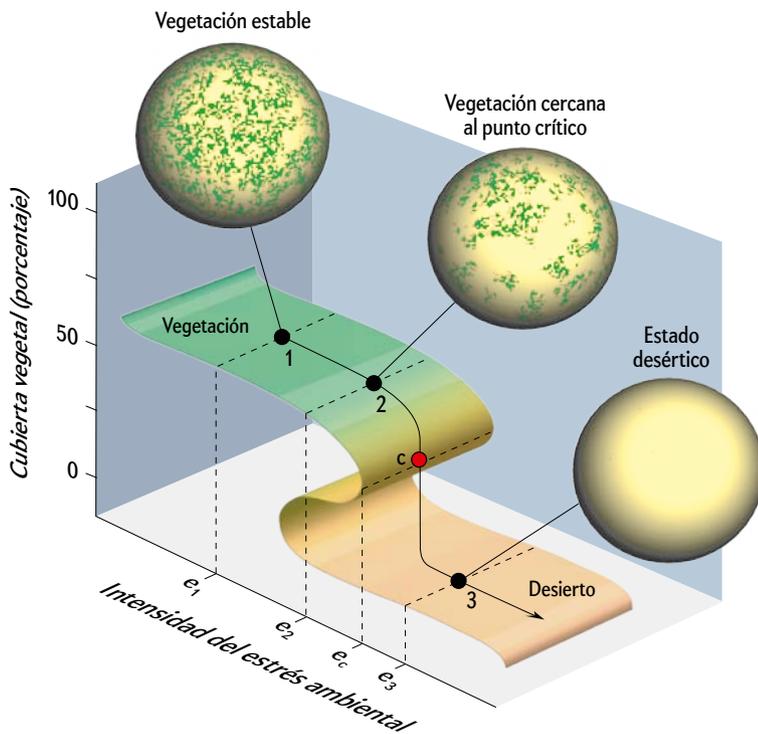
La biología sintética nos ayudaría a abordar de forma racional numerosos retos ambientales mediante la introducción de organismos modificados que permitan resolver este tipo de situaciones, pero también permitiría incorporar mecanismos de control y estabilización. Cuando el organismo sintético no operara de forma eficiente, o dejara de aportar alguna ventaja (en el caso del sistema árido, cuando se hubieran alcanzado ciertas condiciones de humedad debido a la mayor cubierta vegetal, y en el caso del plástico, cuando se hubiera consumido

Evitar el colapso de un ecosistema

Los **ecosistemas áridos**, sometidos a un fuerte estrés ambiental a causa de la escasez de agua y el sobrepastoreo, se caracterizan por una fragilidad extrema. Su respuesta ante el deterioro de las condiciones puede ser brusca y dar lugar al colapso y a la desertificación. La biología sintética podría ayudar a evitarlo al restablecer la humedad edáfica y facilitar la regeneración vegetal.

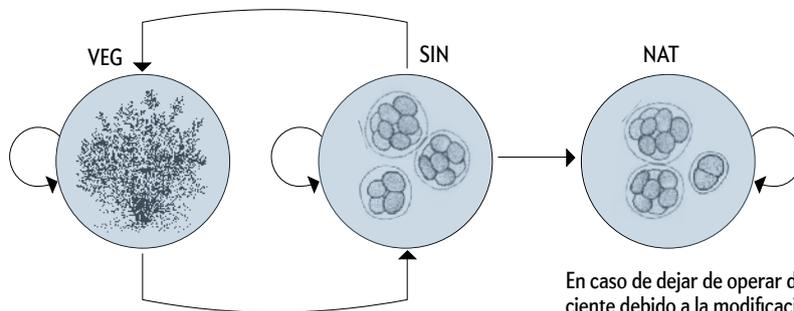
Transición crítica

La desertificación puede representarse gráficamente como la pérdida de cubierta vegetal con el aumento del estrés ambiental (intensidad de forrajeo o estrés hídrico) (*izquierda*). Al principio se atraviesan de forma continua distintos estados (puntos 1 y 2) que permiten la presencia de vegetación. Pero, a partir de cierto punto crítico (c), el ecosistema experimenta un cambio súbito que implica el colapso hacia un estado desértico (punto 3). Esta transición brusca ya se ha dado en algunas zonas y es muy posible que vuelva a tener lugar en el futuro (*derecha*).



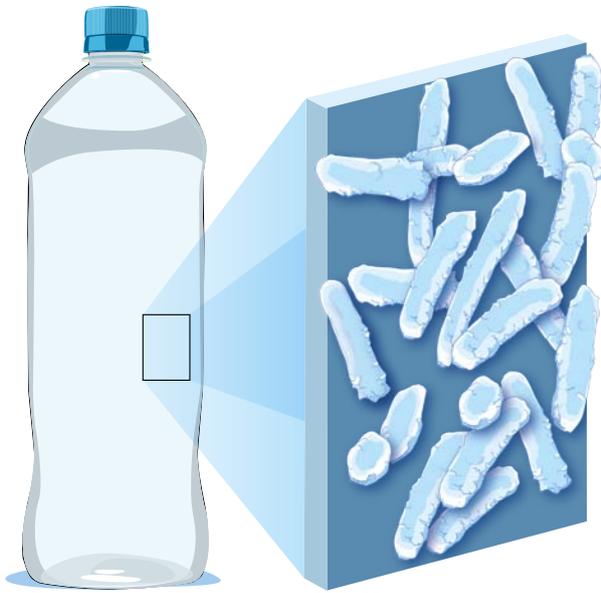
Reparación sintética

Una forma de impedir esta transición catastrófica consistiría en emplear una especie microbiana del suelo, como el alga unicelular *Nostoc*. A partir de la variante natural (NAT) de esta alga puede crearse una variante sintética (SIN) capaz de establecer o reforzar una interacción mutualista con la vegetación (VEG).



La variante sintética segrega, por ejemplo, una molécula que mejora la retención de agua en el suelo, lo que permite la persistencia e incluso la expansión de la vegetación, lo que a su vez mejorará las condiciones en las que se desenvuelve la especie modificada.

En caso de dejar de operar de forma eficiente debido a la modificación de las condiciones, el organismo sintético reverte a su forma original, con lo que se evita su dispersión en el ambiente.



EN LOS SUSTRATOS PLÁSTICOS se ha descubierto una bacteria, *Ideonella sakaiensis*, que logra vivir del plástico de tipo PET al incorporar sus componentes (etilenglicol y ácido tereftálico) como biomasa. De este modo, no solo elimina el plástico del entorno, sino que al mismo tiempo retira CO₂ de la atmósfera. Además, su desarrollo queda confinado a aquellos lugares donde hay estos plásticos, por lo que se evita su dispersión a otros hábitats. Este sistema puede servir de modelo para crear ecosistemas sintéticos en otros sustratos, de manera que contribuyan a procesar otros desechos o sustancias contaminantes.

todo el material), simplemente revertiría a su forma original. Ello supone una barrera genética y también ecológica a la dispersión de los organismos modificados, que serían inviables fuera de las condiciones estrictas del sistema para el que se han diseñado.

Estos son solo dos ejemplos de un conjunto bien definido de formas de diseñar circuitos ecológicos de terraformación. Todos ellos implican el empleo de una especie modificada que aporta una función de interés ecológico, desde el procesamiento de contaminantes hasta la mejora de la resistencia al estrés, y evita así el colapso del ecosistema.

POSIBILIDADES Y OBSTÁCULOS

En ecología, se considera que un ecosistema se ha recuperado cuando este alcanza un equilibrio en la composición de especies, la estructura espacial y los procesos dinámicos [véase «Reforestación», por P. J. Rey y J. M. Alcántara; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2011]. En este sentido, nuestro objetivo no es simplemente diseñar nuevas especies que desarrollen una función biorremediadora, sino crear sistemas ecológicos estables y autosostenibles donde las estrategias mutualistas y de facilitación de nicho nos permitan expandir las poblaciones de organismos capaces de paliar los efectos derivados de actividades humanas.

La ventaja de emplear una conexión cooperativa entre dos especies es que, según indican nuestros modelos teóricos, el sistema diseñado queda confinado a llevar a cabo una función bien definida en un contexto ecológico que lo limita. El grado de dependencia del organismo sintético desemboca así en un control doble: genético y ecológico.

Se trata de una estrategia ambiciosa que, sin duda, requerirá estrategias interdisciplinares y la creación de conocimiento a caballo entre la ecología de poblaciones, la ingeniería de ecosistemas, la biología sintética y la genética molecular. La propuesta choca frontalmente con las posiciones conservadoras que abogan por la restauración de los ecosistemas a sus estados primigenios y la eliminación, cuando sea preciso, de las especies que se consideran exóticas. Pero hay que admitir que la inmensa mayoría de los hábitats que nos rodean, incluso los cada vez más reducidos puntos calientes de biodiversidad, que debemos preservar a toda costa, han experimentado un mayor o menor impacto antropogénico. Como señala la bióloga y experta en temas ambientales Emma Marris, devolverlos a su estado anterior «es simplemente demasiado difícil».

El planteamiento que defendemos ya se ha puesto en práctica con el diseño de algunos ecosistemas sin el empleo de organismos sintéticos. Por ejemplo, Margaret Palmer, experta en restauración de ecosistemas de la Universidad de Maryland, ha liderado la visión de que la restauración de un ecosistema histórico del que apenas sabemos nada (y que posiblemente sea irreparable) debe ser reemplazada por el diseño y la ingeniería, que darán lugar a nuevos ecosistemas que tendrán poco que ver con sus predecesores [véase «Límites de la restauración de humedales», por David Moreno Mateos; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2015]. Estos ecosistemas artificiales pueden ser de hecho más diversos y eficientes.

Cabe preguntarse si las ventajas que ofrecería la terraformación basada en la biología sintética, que correspondería a una forma de bioingeniería, podrían reemplazar a las que aportaría la geoingeniería. Sin duda, una ventaja clara (y una diferencia esencial) es que la bioingeniería implica construir máquinas que están vivas y se multiplican, con lo que extienden su acción a medida que se propagan por el sistema que deseamos cambiar. Y ante el recelo que pueden suscitar las comunidades sintéticas, es preciso señalar, una vez más, que estas no tienen por qué ser menos interesantes o irrelevantes que las que etiquetamos como «naturales». Por último, no olvidemos que —igual que ocurrió en Ascensión— tras unas décadas de desarrollo puede emerger un nuevo ecosistema de gran complejidad. Si realmente deseamos preservar la biodiversidad de nuestro planeta para las generaciones venideras, es muy posible que lo logremos solo si combinamos la protección de los hábitats que se han conservado hasta hoy con la creación de condiciones adecuadas para la emergencia de los ecosistemas artificiales que también formen parte de nuestro futuro. 

PARA SABER MÁS

Bioengineering the biosphere. Ricard Solé en *Ecological Complexity*, vol. n.º 22, págs. 40-49, 2015.

Synthetic circuit designs for earth terraformation. Ricard V. Solé, Raúl Montañez y Salva Duran-Nebreda en *Biology Direct*, DOI: 10.1186/s13062-015-0064-7, julio de 2015.

A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). Shosuke Yoshida et al. en *Science*, vol. 351, n.º 6278, págs. 1196-1199, marzo de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Límites de un planeta sano. Jonathan Foley en *IyC*, junio de 2010.

Ecosistemas al borde del colapso. Carl Zimmer en *IyC*, diciembre de 2012.

Las matemáticas de la biodiversidad. Jordi Bascompte en *IyC*, octubre de 2013.

MÁS DE 100 PREMIOS NÓBEL

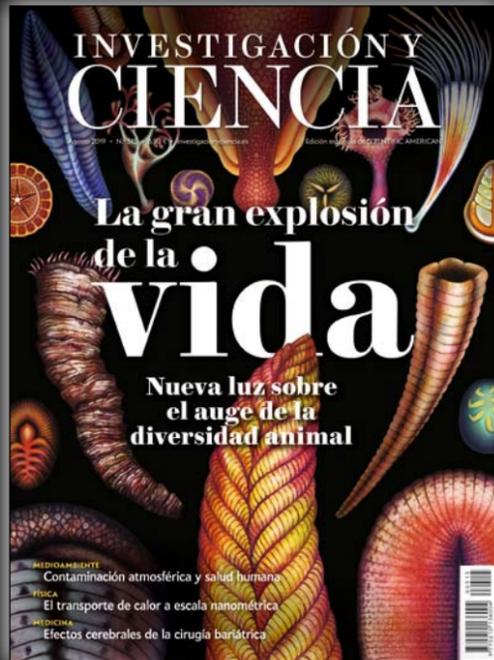
han explicado sus hallazgos en
Investigación y Ciencia



Descubre todos los artículos en

www.investigacionyciencia.es/nobel

NUESTRAS PUBLICACIONES



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Desde 1976, divulga el desarrollo de la ciencia y la técnica con la colaboración de los mejores expertos internacionales

Revista mensual

Formatos: papel y digital



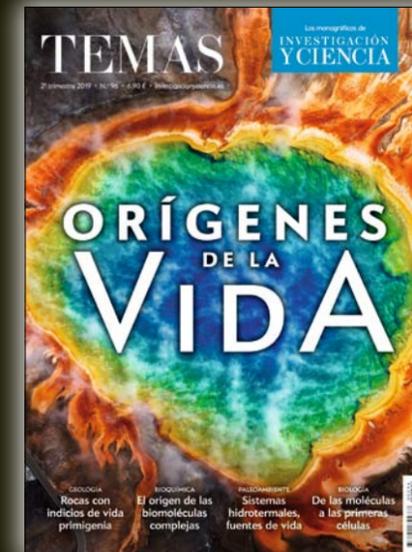
MENTE Y CEREBRO

Desde 2002, divulga los avances más sólidos en el dominio de la psicología y las neurociencias

Revista bimestral

Formatos: papel y digital

MONOGRÁFICOS



TEMAS de IyC

Monografías sobre los temas clave que guían el desarrollo de la ciencia

Revista trimestral

Formatos: papel y digital

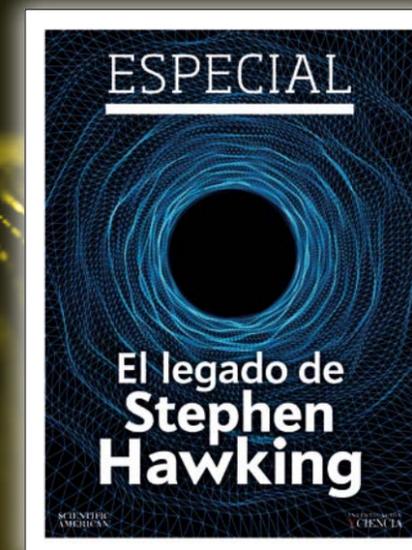


CUADERNOS de MyC

Monografías sobre los grandes temas de la psicología y las neurociencias

Revista cuatrimestral

Formatos: papel y digital



ESPECIAL

Recopilaciones de nuestros mejores artículos (en PDF) sobre temas de actualidad

Formato: digital

Consulta promociones, suscripciones, packs y otros productos en

investigacionyciencia.es/catalogo