

Escudos contra la

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 éste preocupa. Allá 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 ecologistas 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 sólo 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.

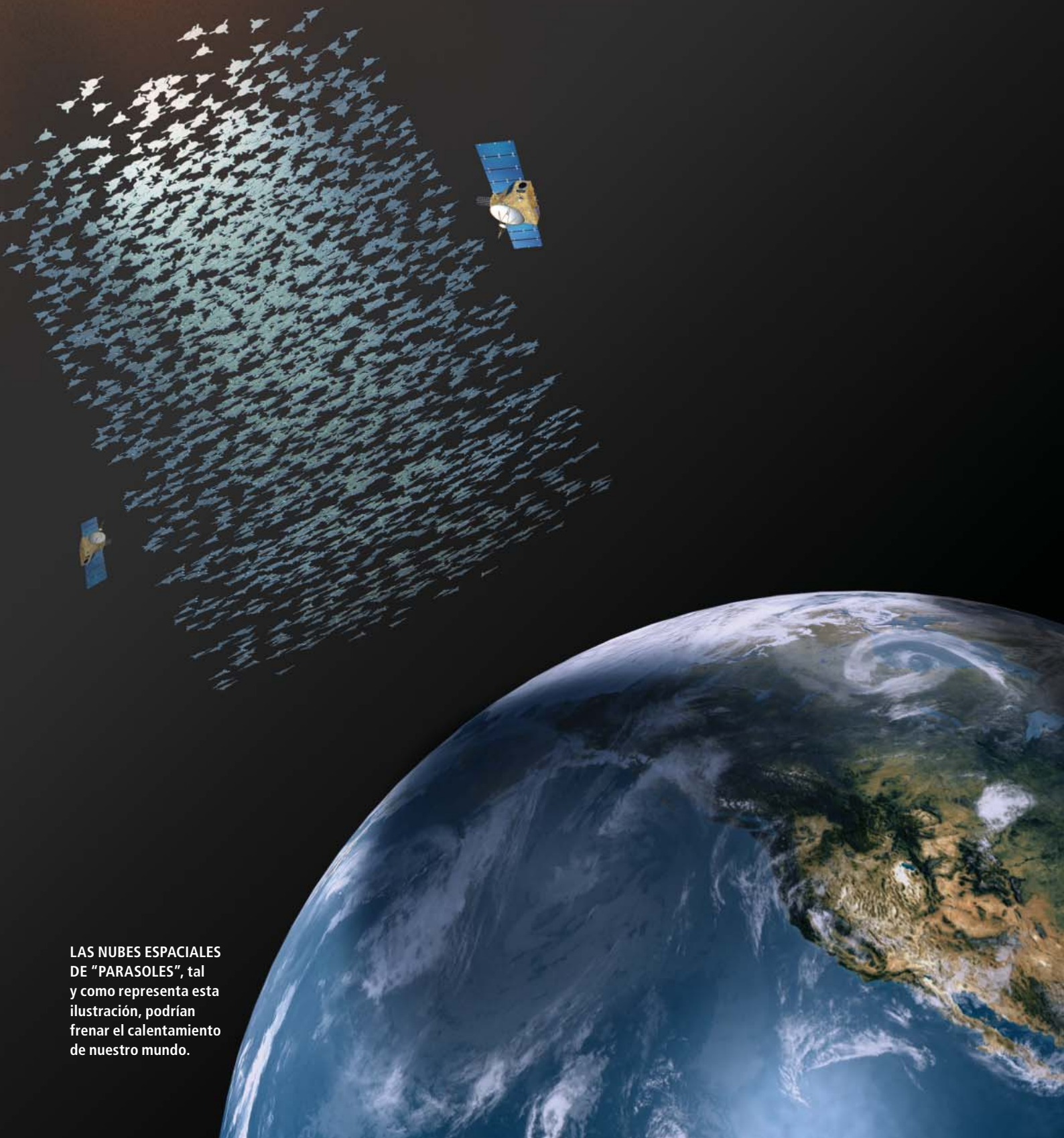
Y en tercer lugar está la gran repercusión que tuvo en 2006 un artículo publicado en la revista *Climatic Change*, donde Paul J. Crutzen pedía que se tomase muy en serio la geoingeniería. Crutzen recibió el premio Nobel de Química en 1995 por sus trabajos sobre la destrucción del ozono atmosférico.

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.

CONCEPTOS BASICOS

- 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 abri llantan las nubes sobre los océanos mediante la inyección de sal marina en la atmósfera o proyectan construir una sombrilla en el espacio.

radiación solar



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



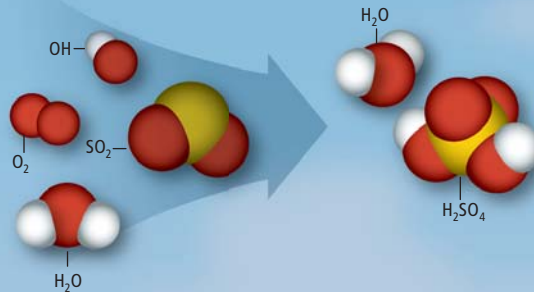
DESPLIEGUE POR AVIONES

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

ESTRATOSFERA

COMO 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.



El autor

Robert Kunzig es escritor científico especializado en ciencias oceánicas y clima global. 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 acaba de publicar *Fixing Climate: What past Climate Changes Reveal About the Current Threat — and How to Counter it*.

INCONVENIENTES

- **CAMBIOS IMPREDECIBLES** en los vientos locales y en los patrones de las lluvias.
- **MENOR EVAPORACION**, reducción de la lluvia global.
- **AUMENTO DE LA LLUVIA ACIDA**, contaminando posiblemente ecosistemas aún intactos.
- **DESTRUCCION ACCELERADA** 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.

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 sólo 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 sólo al peso del azufre) de unos cinco millones de toneladas al año; Crutzen 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.

Neblina marina en la troposfera

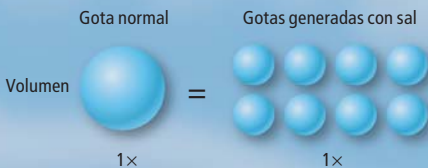
El agua del mar inyectada en el aire se evapora según asciende; cuando llega a los 300 metros apenas si queda algo más que cristales de sal. Esos cristales podrían abrillantar las nubes que se forman a tales altitudes y reflejar más luz solar hacia el espacio.

DESPLIEGUE

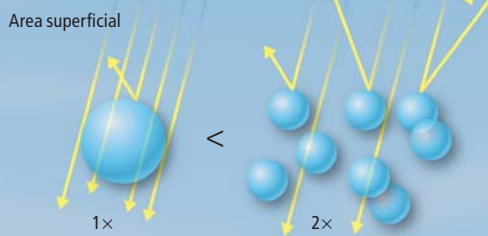
Barcos Flettner sin tripulación, guiados por satélite, surcarían los océanos; mientras, expelerían una bruma de agua de mar hacia el cielo por medio de unos rotores verticales. Turbinas movidas por el desplazamiento del barco a través del agua generarían la electricidad necesaria para impulsar los rotores, 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.

COMO 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 sólo 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.

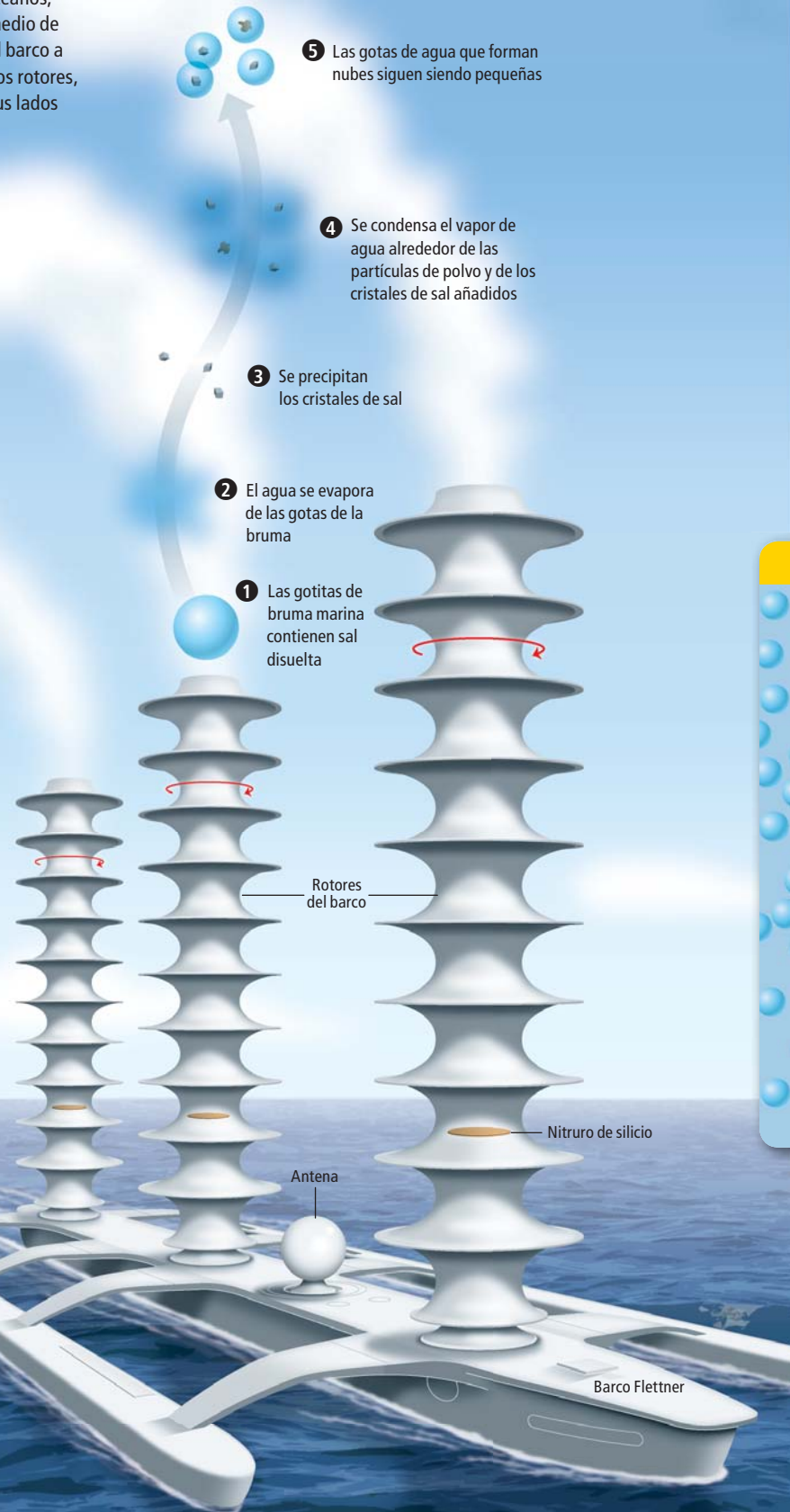
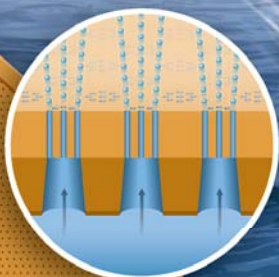


La mayor superficie de las gotas pequeñas produce una mayor reflexión hacia el espacio de la luz solar entrante; por esa razón, las nubes que forman serían más brillantes y se enfriaría la superficie de los océanos que tuviesen debajo.



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.



“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 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 abrillantamiento no se conoce bien.
- EFECTO NO PROBADO; 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.

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 sólo 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 sólo 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 sólo se añade CO_2 ; en resumen, la geoingeniería todavía representaría una mejora frente a otras soluciones.

Lloviera 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 sólo 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.

Según los cálculos de Tilmes, 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

Billones de discos en el espacio

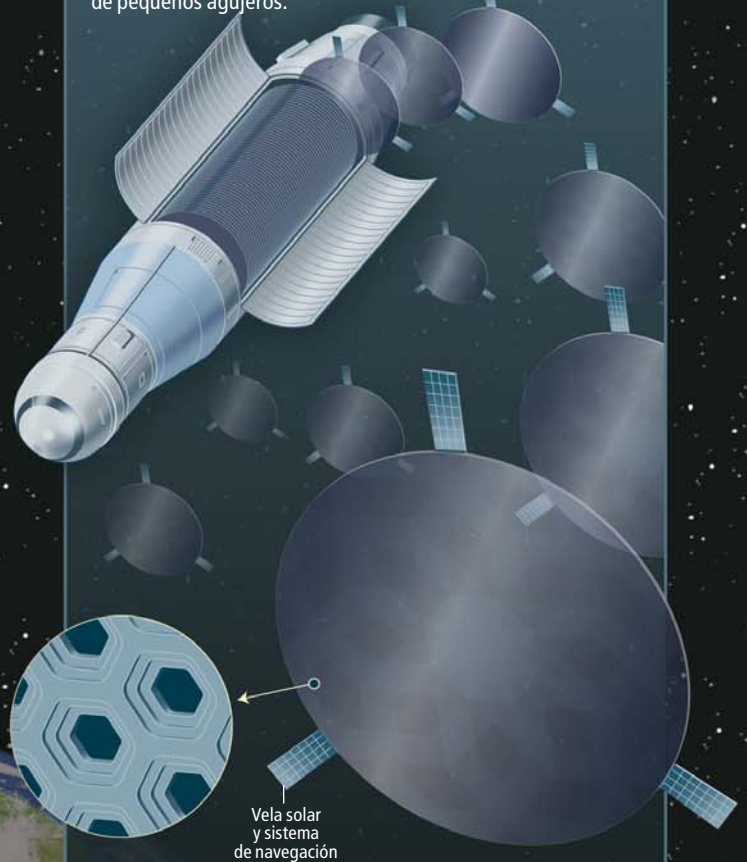
Billones de artefactos voladores con forma de disco y algo más de medio metro de diámetro colocados en una órbita solar estacionaria darían sombra suficiente para enfriar la Tierra. La construcción de una sombrilla espacial evitaría que se tuviese que manipular la atmósfera terrestre.

DESPLIEGUE

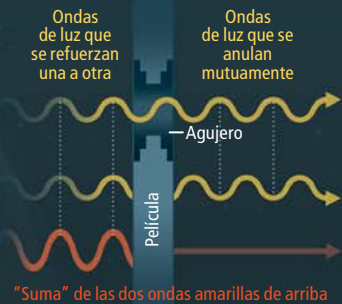
Los discos voladores, cada uno equipado con un sistema de navegación a bordo, se apilarían en cilindros de un millón de discos. Se los lanzaría al espacio por medio de cañones de bobina electromagnética al ritmo de un cilindro por minuto durante 30 años. El peso total de los cilindros no debe llegar 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.

COMO 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 acribillado 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.



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.

INCONVENIENTES

- EL COSTE ESTIMADO, 5 billones de dólares, que podrían emplearse en energías alternativas.
- SE NECESITA MUCHO TIEMPO PARA SU CONSTRUCCION, demasiado para una intervención urgente.
- CAMBIOS IMPREDECIBLES en los vientos locales y patrones de lluvias.
- MENOR EVAPORACION, 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.

zona con radiación ultravioleta cancerígena. Rasch señala, no obstante, que los resultados de Tilmes 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 sólo 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 sólo 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 sólo en un 4 por ciento de la extensión de los océanos.

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 sólo 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 éstas. 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 sólo 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

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.

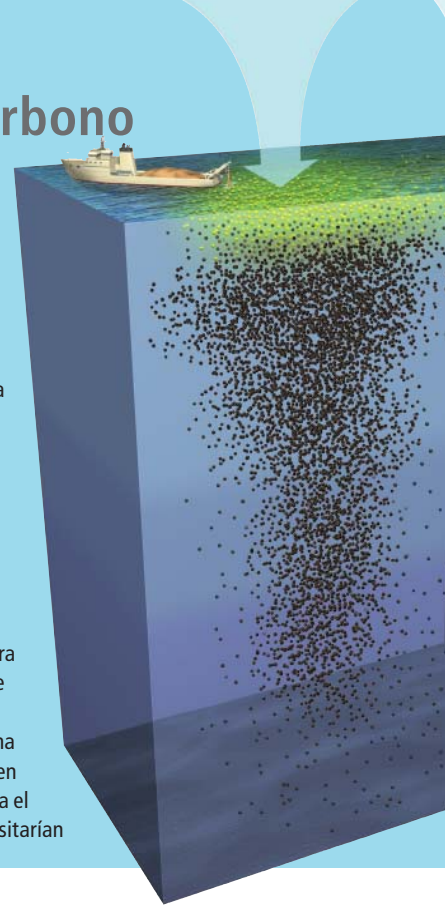
Otro mecanismo, propuesto más recientemente por Kurt Zenz House y sus colaboradores, de la Universidad de Harvard, consiste en hacer que el agua del mar sea más alcalina. House propone descomponer la sal —el cloruro sódico— del mar para que el cloro y el sodio reaccionen con el agua marina y se creen 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

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 espaciarían 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 adelantaría 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,

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”**.





cien grandes plantas para absorber una décima parte del CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ atmosférico como un papel atrapamoscas. Cuando el plástico rico en CO₂ se enjuaga con vapor de agua se produce una corriente de CO₂ 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 CO₂ para enriquecer la atmósfera de sus plantas.

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 sombrija desperdiciaría la luz del Sol.

Lo inteligente y lo estúpido

La geoingeniería no puede resolver el problema del CO₂, en parte porque éste no se reduce al calentamiento global. Si nos limitáramos a frenar el calentamiento global con un quitasol, el CO₂ seguiría fluyendo hacia los océanos, incrementarían su acidez poco a poco y con el tiempo habría consecuencias ecológicas nefastas. No obstante, parar el calentamiento global aunque sólo 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, ésta 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 sombrija y termináramos por dejar que se perdiese. Ray-

mond 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, sólo 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 sombrija 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”.

Bibliografía complementaria

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