



Desde tiempos inmemoriales, el hombre sueña con poder comandar al cielo haciéndolo llover y así transformar regiones secas en praderas y campos florecientes. Pero hasta ahora, lamentablemente, nadie ha logrado que este sueño se haga realidad. En la Antigua Grecia, los campesinos imploraban a Zeus que les enviara lluvias, y todavía hoy, muchos pueblos indígenas realizan danzas de la lluvia rogando a sus dioses que se precipite suficiente agua sobre sus campos. Nada de lo

molina toneladas de arena y polvo en la atmósfera. Los granos de arena de mayor tamaño pronto se depositan otra vez en el suelo; las partículas pequeñas, en cambio, se trasladan en parte hasta la estratosfera (es decir a más de diez kilómetros de altura) y comienzan a "vagar sin rumbo fijo" alrededor del planeta (Fig. B). Así, por ejemplo, una parte del polvo en suspensión sobre Florida proviene del desierto del Sahara africano. ¿Pero qué relación tienen los aerosoles con la lluvia?

## Polvo en la computadora del clima

Porqué los investigadores cuentan las partículas mas pequeñas

referido puede relacionarse con las ciencias naturales modernas, porque los científicos no son hacedores de lluvias, por lo menos eso se supone... No obstante, hasta la década de 1970 los científicos estadounidenses exploraron posibilidades de generar lluvia artificialmente. Y hoy, investigadores israelíes de nuevo han retomado estos ensayos.

En el centro de estos estudios no encontramos métodos modernos de adoración de los dioses, sino **aerosoles**. El término se refiere en realidad a las partículas en suspensión y al aire que las rodea. Expresado en términos científicos, se los define como: "**Suspensiones** estables en el aire, que consisten en partículas sólidas o líquidas". Una partícula en suspensión de tamaño medio mide aproximadamente 100 nanómetros y es, por lo tanto, unas 2.000 veces más pequeña que el punto al final de esta oración. Este tipo de partículas se forman, por ejemplo, en cada tormenta de arena, en la cual el viento arre-

Desde mediados del siglo pasado, los investigadores saben que las partículas en suspensión constituyen núcleos de condensación de las pequeñas gotas que componen las nubes, sobre las que se deposita agua en forma estratificada; esto produce que el vapor de agua en estado gaseoso se vuelva líquido. Los factores que determinan la acumulación de agua son la humedad del aire en el ambiente, la temperatura y la composición química de las partículas (higroscopicidad). Cuando el aire circundante está sobresaturado de vapor de agua,



A

► Las principales fuentes de los aerosoles son los cristales salinos, los granos de arena y las partículas de hollín, presentes en las emisiones gaseosas industriales, entre otras.



→ una parte de las partículas se activa. En virtud de la acumulación de agua, éstas exceden un radio crítico y van creciendo hasta formar una gotita de una nube. Una vez que hay gotas de gran tamaño en cantidad suficiente, llueve. Entonces, ¿qué puede ser mejor que trasladar a la atmósfera aerosoles artificiales en avión y esperar a que llueva sobre las regiones que estén debajo? En el pasado, se utilizaron ante todo los cristales de yoduro de plata para estos experimentos, aunque sin demasiado éxito. Y no sólo los involucrados en estos experimentos aprendieron muy pronto que los fenómenos naturales son muchísimo más complejos que lo supuesto hasta ese momento.

### A PEQUEÑAS PARTÍCULAS, GRÁN EFECTO

Los científicos detectaron rápidamente que los aerosoles son sustancias de alta complejidad, que de acuerdo con su origen poseen numerosos componentes y un amplio espectro de características físico-químicas (ver recuadro). En la naturaleza, principalmente, la erosión eólica del suelo es la encargada de crear los aerosoles. En este caso contienen, sobre todo, componentes minerales. Pero las actividades humanas como la desertificación por sobrepastoreo y la erosión de los campos por acción del viento como consecuencia de diversas técnicas de explotación de la tierra influyen en el ascenso del polvo mineral a la atmósfera. Sobre los mares, el viento arremolina aerosoles salinos en la atmósfera. Con la combustión de biomasa (de la que forman parte la quema de leña y de desechos agropecuarios, y el desmonte ocasionado

por incendios forestales) también se forman minúsculas partículas, principalmente de hollín y de otros enlaces carbónicos. En las ciudades y en las regiones industriales, el hombre proporciona enormes cantidades de aerosoles que provienen, por ejemplo, de las plantas de fabricación de cemento, de vidrio, de fundiciones, de empresas siderúrgicas y metalúrgicas o del transporte. Por cada tonelada de acero bruto que se producía a mediados del siglo pasado, llegaban a la atmósfera aproximadamente 15 kg de aerosoles. Hoy, a pesar de los sistemas de filtrado de grandes dimensiones, siguen siendo 2 kg. Por combustión de las materias primas fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural, si éstos contienen azufre, junto con los aerosoles compuestos de hollín también se forman aerosoles de sustancias orgánicas y de sulfatos. Pero los sulfatos junto con el agua forman ácido sulfúrico, uno de los principales componentes de la **lluvia ácida**. Dado que hoy los combustibles fósiles se comercializan en parte libres de azufre, la cantidad de aerosoles sulfatados en Europa y en los EE.UU. se ha reducido claramente en los últimos 20 años.

La principal proporción de sustancias en suspensión en la atmósfera la representan el polvo mineral y la sal marina. Ambas superan en amplia medida las partículas que proceden de fuentes antropogénicas. A pesar de ello, las partículas de sulfato y hollín tienen un impacto mayor en las características ópticas del aerosol, dada su capacidad de difundir o de absorber con mucha eficacia el impacto de la radiación solar. Esto se debe, sobre



▲ Tormenta de arena sobre Italia observada por el satélite de investigación europeo ENVISAT el 29.8.2003.

todo, a su tamaño: mientras las partículas de polvo y de sal marina miden entre dos y diez micrómetros (milésimas de milímetro), las partículas de sulfato y de hollín miden entre 0,1 y dos micrómetros. Mientras tanto, sólo en Europa se producen cada año unas 40.000 toneladas de aerosoles. “Y como aquí no hay desiertos con tormentas de arena y la combustión de la biomasa tampoco influye en demasía, estos aerosoles antropogénicos, es decir producidos por el hombre, desempeñan un rol decisivo en Europa”, explica Johannes Quaas del Instituto Max-Planck de Meteorología con sede en Hamburgo. Quaas investiga cómo los aerosoles influyen en la formación de las nubes para entender cómo los aerosoles antropogénicos influyen en el clima.

“Los aerosoles influyen principalmente en la radiación solar y, por ende, en la energía de la superficie terrestre”, expresa Quaas. Dispersando, por un lado, la luz solar de vuelta hacia el espacio (**efecto directo de los aerosoles**) y, por el otro, alterando las características ópticas de las nubes (efecto indirecto de los aerosoles), tienden a tener un efecto refrigerante en la Tierra (**Fig. C**).

Es posible explicar el impacto directo tomando como ejemplo un invernadero: antes, cuando en el verano hacía demasiado calor en el interior de los invernáculos, se pintaban los techos con pintura a la cal rebajada. De este modo, la radiación solar que impactaba en los invernaderos no ingresaba a la construcción con la misma intensidad, sino que se

## PARTÍCULAS DE AEROSOL Y SU DISTRIBUCIÓN

Tipo de aerosol	Sulfato	Hollín	Orgánico	Sal marina	Polvo	Total
Total de concentración global [mg/m <sup>2</sup> ]	6,2	0,23	1,9	20,6	18,5	47,4
Total de concentración sobre el suelo [mg/m <sup>2</sup> ]	8,3	0,46	4,0	4,9	39,7	57,4
Total de concentración sobre Europa [mg/m <sup>2</sup> ]	8,3	0,21	0,71	12,6	11,3	33,1
Total de concentración sobre el suelo europeo [mg/m <sup>2</sup> ]	9,9	0,30	0,99	6,4	11,5	29,1

(La superficie total de la Tierra comprende 510 millones de km<sup>2</sup>, la superficie de la tierra firme comprende 150 millones de km<sup>2</sup>, Europa ocupa una superficie total de 13 millones de km<sup>2</sup>, en tanto que la tierra firme europea posee 6 millones de km<sup>2</sup>.)

© Instituto Max-Planck de Meteorología

## FORZANTE RADIATIVO

Componente del aerosol	Forzante radiativo W/m <sup>2</sup>
Sulfato antropogénico	Entre -0,3 y -0,4
Hollín originado en combustibles fósiles	Entre +0,1 y +0,4
Hollín originado en la combustión de biomasa	-0,2
Efecto antropogénico en las nubes de lluvia*	Entre -1,0 y -2,0*
Sulfato natural	-0,2
Polvo Mineral	Entre -0,6 y +0,4
Sal marina	-2,0

### Gases de efecto invernadero

Dióxido de carbono	+1,5
Metano	+0,42
Todos los gases de efecto invernadero	+2,43

Un signo positivo antepuesto significa calentamiento, un signo negativo, enfriamiento.

\*Cifras más recientes: entre -0,3 y -2,0, probablemente incluso sólo hasta -1,0.

dispersaba hacia lo alto desde el techo. Las partículas de aerosol son para la atmósfera, lo que era la pintura a la cal para el invernadero. Una de las funciones básicas de las nubes es retornar una parte de la luz solar al espacio, con un efecto por lo tanto refrigerante. Incluso nosotros podemos experimentar este fenómeno en persona. Debajo de una nube tendremos más sombra y hará más fresco. ¿Pero cómo influyen las pequeñas partículas de aerosol sobre una gigantesca formación como una nube? Cuanto más aerosoles floten en el aire, más gotitas de nube se formarán, y como sólo hay cierta cantidad de agua, cada una de las gotas será, por ende, más pequeña; la consecuencia es una nube más "densa", lo cual provoca que la nube refleje la luz del sol con mayor intensidad y que menos energía penetre en la superficie de la Tierra. Cuanto más pequeñas las gotitas en la nube, tanto menor será la probabilidad de que se agrupen en gotas de mayor tamaño y que se precipiten al suelo. Por lo tanto, se incrementan el ciclo de vida de las nubes y su contenido de agua. Esto también provoca que más luz solar sea "reenviada" al espacio. En términos técnicos, a este enfriamiento se lo llama "**forzante radiativo negativo**".

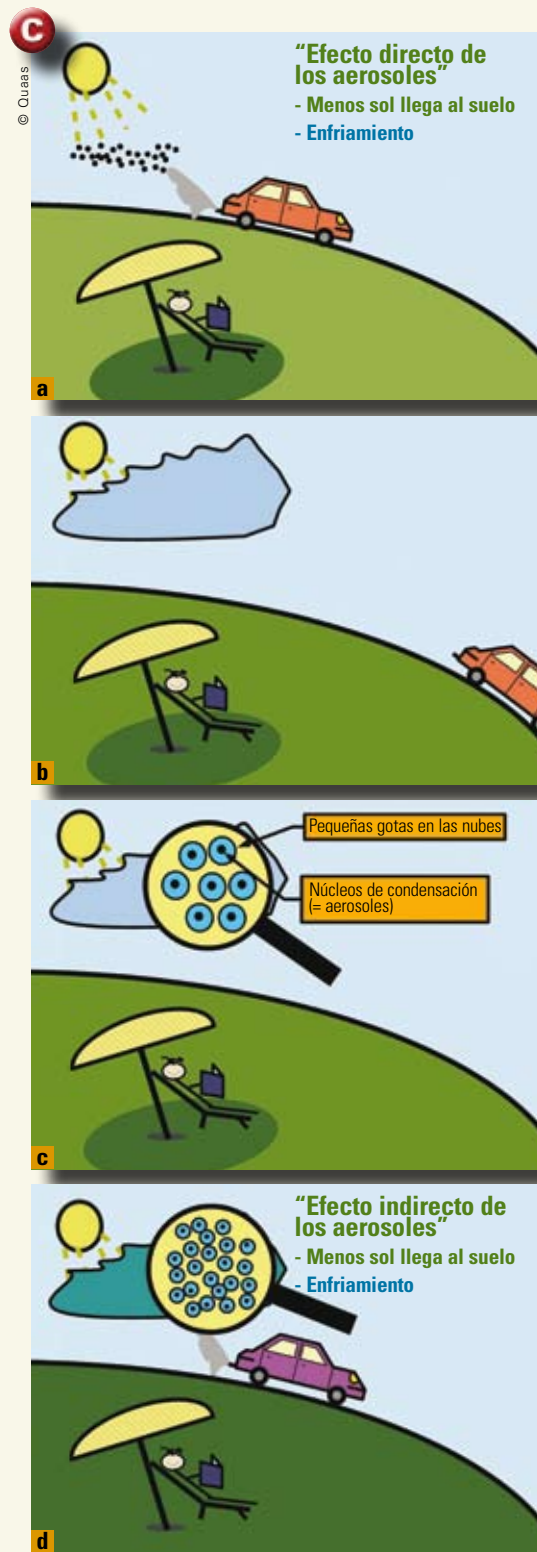
"Estos efectos refrigerantes de los aerosoles en su conjunto son casi tan fuertes como el **efecto invernadero** que calienta la atmósfera y, por eso, revisten enorme importancia para nuestro clima", comenta Johannes Quaas. "La tierra firme también es relativamente oscura. Pero los desiertos tienen casi el mismo color que las nubes y éstas, a su vez, se parecen mucho a los aerosoles". Los investigadores resuelven este problema ana-

tivo de los aerosoles, proveniente de fuentes antropogénicas ronda entre -1,1 y -2,2 W/m<sup>2</sup>. Esto representa entre el 60 y el 90% del total del forzante radiativo de los gases de efecto invernadero (**tabla sobre la izquierda**). Pero estas estimaciones poseen un grado de incertidumbre mucho mayor que las referidas a los gases de efecto invernadero (los más recientes resultados señalan que el forzante radiativo es un poco más débil, rondando entre los -0,5 y los -1,5 W/m<sup>2</sup>). "Sólo si entendemos los efectos que tienen los aerosoles podremos predecir los cambios climáticos a largo plazo", resalta el meteorólogo.

## FIGONES DEL UNIVERSO

Para analizar los efectos de los aerosoles, los investigadores primero tienen que determinar qué cantidad de aerosoles se encuentra en la atmósfera. Entre otras cosas, aprovechan una red mundial que conforman estaciones meteorológicas automatizadas, de las cuales seis se localizan en Alemania. "Podemos imaginarnos estas estaciones como equipos ópticos que miran al cielo", acota Quaas. Para sus observaciones, los científicos están supeditados al buen tiempo. Porque las mediciones ópticas como las que realizan las estaciones sólo funcionan cuando ninguna nube obstruye la "visión" de los instrumentos de medición. Los aparatos miden, ante todo, el porcentaje de luz solar que no es absorbido o dispersado en la atmósfera por los aerosoles o las otras sustancias. De estos datos, los investigadores pueden sacar conclusiones relativas a la concentración de los aerosoles, al tamaño de las partículas y a su respectiva cantidad. Si quieren investigarse procesos a escala global y proyectados a períodos de tiempo relativamente extensos, las observaciones satelitales son las más adecuadas. Los satélites que giran alrededor de la Tierra pasando por los polos pueden observar diariamente una vez (casi) todo punto de la superficie de la Tierra. Los instrumentos satelitales modernos están en condiciones de medir numerosas características de los aerosoles y de las nubes.

Pero la interpretación de los valores medidos no es simple. Los meteorólogos de Hamburgo deben saber lo que ha observado el satélite. "Las nubes son blancas, los océanos, por el contrario, se divisan desde arriba en color negro: por eso es fácil diferenciarlos", dice Quaas. "La tierra firme también es relativamente oscura. Pero los desiertos tienen casi el mismo color que las nubes y éstas, a su vez, se parecen mucho a los aerosoles". Los investigadores resuelven este problema ana-



▲ **Aerosoles**, por ejemplo partículas de hollín de los gases de escape de los automóviles, dispersan la luz solar, regresándola al espacio (**efecto directo de los aerosoles**; a) con un efecto refrigerante. Las nubes tienen las mismas propiedades (b). Los aerosoles son núcleos de condensación para las nubes (c). Cuantos más aerosoles estén suspendidos en el aire, más gotitas se formarán en las nubes. Gracias a ello, la nube tendrá más "densidad" y reflejará más la luz solar regresándola al espacio (**efecto indirecto de los aerosoles**; d).



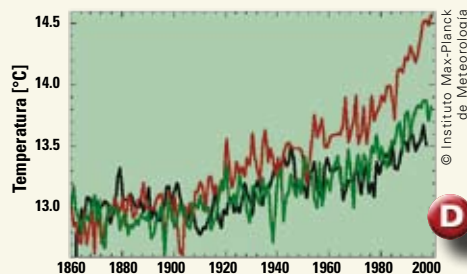
→ lizando las diversas zonas espectrales por separado: ¿Qué aspecto tiene una nube en comparación con un desierto a través de un filtro rojo y después por medio de uno verde? Las nubes también pueden ser diferenciadas de los aerosoles aplicando un sistema similar. Entonces, los científicos comparan, entre otras, las cantidades de aerosoles halladas con las características de las nubes que han observado. Y con estos datos y muchos otros más alimentan sus modelos de cálculo en la computadora.

En principio, los modelos climáticos no son otra cosa que complejos sistemas de ecuaciones con algunas docenas de variables (ante todo temperatura, presión atmosférica, contenido de humedad en la atmósfera y velocidad del viento) que describen lo que sucede con el clima. Deben dar respuesta a la pregunta, si los cambios climáticos observados desde que se inició la Revolución Industrial en el siglo XIX se retrotraen a la actividad del hombre o si se deben a razones naturales. Hasta ahora, estos estudios se concentraron en el impacto del incremento de CO<sub>2</sub> y de otros gases de efecto invernadero. Sólo unas pocas simulaciones tienen en cuenta los complejos efectos climáticos del incremento antropogénico de partículas en la atmósfera. “Estudiando el impacto de los aerosoles en el clima, incorporamos más ecuaciones y variables al modelo”, según Quaas. Los resultados de los investi-

gadores del Instituto Max-Planck nos dan a entender que los aerosoles antropogénicos han reducido aproximadamente 0,4 °C las temperaturas promedio de la Tierra desde que comenzó la industrialización en el siglo pasado. Por el contrario, los gases de efecto invernadero emitidos a partir de ese momento produjeron un calentamiento de la Tierra de aproximadamente un grado. En efecto, la temperatura en la Tierra se incrementó en promedio 0,6 °C en comparación con la temperatura de hace cien años (Fig. D) ¿Por eso no tendría sentido aplicar puntualmente los aerosoles para contrarrestar el efecto invernadero antropogénico?

### UN EFECTO QUE SE DESVANECE RÁPIDAMENTE

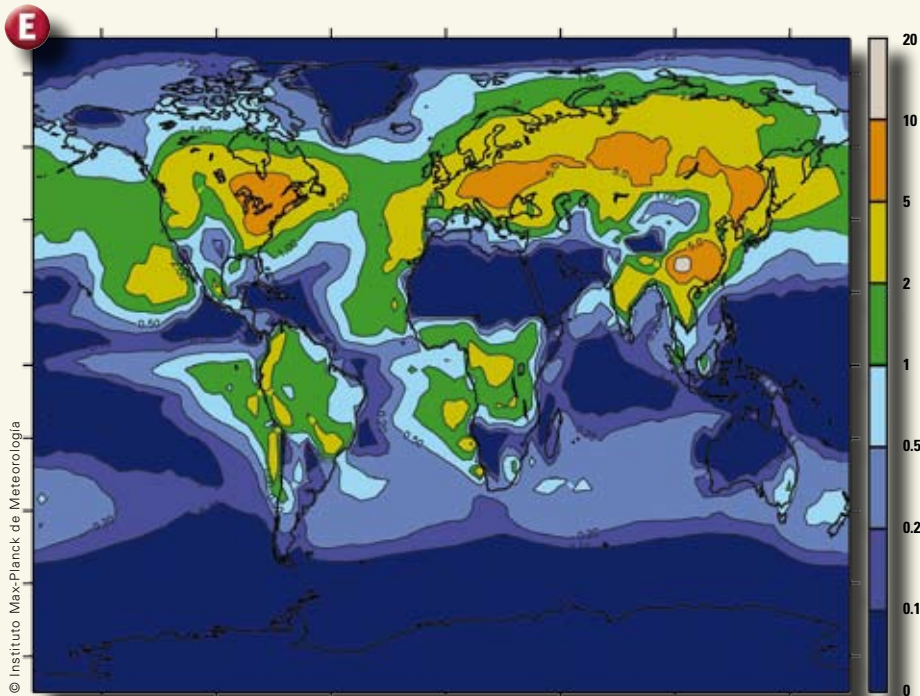
“Si hoy quemamos una tonelada de carbón, produzco aproximadamente una tonelada de aerosoles sulfatados con un ciclo de vida de siete días. Pero, al mismo tiempo, se liberan dos toneladas de dióxido de carbono como gas de efecto invernadero, y éstas seguirán estando en la atmósfera en el año 2050”, explica Johannes Quaas. En otras palabras: mientras los gases de efecto invernadero permanecen durante décadas en la atmósfera y se ocupan de que la Tierra se caliente lentamente, el efecto refrigerante de los aerosoles se desvanece en poco tiempo. Además, muchos aerosoles son perjudiciales para la salud: como tienen un tamaño de unas pocas millonésimas o de unas pocas



▲ Evolución anual de la temperatura media global sobre tierra firme a partir de los datos de observación (color negro) y a partir de dos simulaciones modelizadas: sólo con el efecto invernadero (color rojo) y con los efectos invernadero y de los aerosoles (color verde).

centésimas de milímetro, son capaces de eludir sin inconvenientes los sistemas de filtros de las vías respiratorias de los seres humanos. A través de los bronquios llegan, en parte, al torrente sanguíneo y cuando son portadores de sustancias cancerígenas son peligrosos para el cuerpo.

En determinadas condiciones, los aerosoles incluso pueden reforzar el efecto invernadero; los investigadores del clima observan este fenómeno desde hace algún tiempo en ciertas regiones de China, donde la economía está en auge y la contaminación del aire es extremadamente alta: el enorme contenido de hollín y de ceniza volátil tiñe de gris las nubes y las transforma en verdaderas trampas para los rayos, que después, debido a la radiación absorbida, caen sobre la región como si fueran una “manta eléctrica”. En conclusión, según el estado actual del conocimiento, los aerosoles no son aptos ni para generar lluvias, ni para “frenar” el efecto invernadero antropogénico. “Pero en estos momentos, su investigación es una de las claves esenciales para mejorar los modelos climáticos”, según Johannes Quaas. Y cuanto mejor la calidad de las predicciones climáticas, tanto más esperanza tendremos de que las medidas de protección climática que se adopten sean más comprometidas.



▲ Distribución del efecto indirecto simulado de los aerosoles correspondiente al año 2000; los efectos de los aerosoles son particularmente intensos sobre el este de los EE.UU., Europa Central y del Este, China y el sudeste de Asia.

© Instituto Max-Planck de Meteorología

### PIE DE IMPRENTA

Sociedad Max-Planck, Departamento de Información y Relaciones Públicas, Hofgartenstraße 8, 80539 München / e-mail: presse@gv.mpg.de

**Redacción:** Dra. Christina Beck

**Texto:** Ute Hänslér

**Diseño:** www.haak-nakat.de

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



**SIEMENS**

**DAAD** Deutscher Akademischer Austausch Dienst  
Servicio Alemán de Intercambio Académico

**BASF**  
The Chemical Company

**200 AÑOS**  
BICENTENARIO  
ARGENTINO

Ministerio de  
Ciencia, Tecnología  
e Innovación Productiva  
Presidencia de la Nación