

Los aerosoles carbonosos: un desafío pendiente

por Karl Espen Yttri*, Cathrine Lund Myhre* y Kjetil Tørseth*

Introducción

El nivel de aerosoles en el ambiente sigue representando un gran desafío para la ciencia atmosférica como consecuencia de su capacidad para originar efectos negativos sobre la salud y de influir en el balance radiativo y, por tanto, en la temperatura de la superficie de la Tierra. Sin embargo, nuestro conocimiento de los mecanismos a través de los cuales pueden explicarse los efectos sigue siendo un tema en proceso de investigación. Asimismo, nuestra comprensión acerca de las fuentes y sumideros atmosféricos, así como sobre las propiedades físicas y químicas de los aerosoles, aún no se ha completado.

Una gran parte de las deficiencias que existen a este respecto puede atribuirse a la fracción carbonosa del aerosol, a pesar de que la comunidad científica ha centrado toda su atención en ella durante los últimos 15 ó 20 años. Esto podría explicarse parcialmente por el gran número de especies implicadas en la formación y transformación del aerosol carbonoso, y por el hecho de que las capacidades analíticas actuales resultan insuficientes para completar una caracterización cualitativa y cuantitativa. Asimismo, las emisiones a la atmósfera de partículas carbonosas primarias y de precursores gaseosos de aerosoles carbonosos secundarios apenas se conocen.

Para mejorar esta situación, es necesario contar con un mayor cono-

cimiento de prácticamente todos los aspectos de los aerosoles carbonosos. El presente artículo describe brevemente los efectos principales de estos aerosoles sobre la salud y el clima, y aborda alguna de las lagunas de conocimiento relacionadas con las proyecciones futuras. Además, también trata la necesidad de contar con un mayor desarrollo de las actividades de control para reducir estas lagunas de conocimiento.

El aerosol carbonoso y sus efectos sobre la salud

Desde una perspectiva mundial, se estima que las muertes prematuras ocasionadas por enfermedades cardiovasculares y pulmonares tras la exposición a partículas presentes en el aire ascienden a la nada despreciable cifra de unas 800 000 (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2002). A pesar de la evidencia cada vez mayor de que algunas fuentes de partículas están mucho más relacionadas con efectos negativos sobre la salud que otras (Hoek y otros, 2002; Laden y otros, 2000), la OMS sigue recomendando el uso de tan solo un factor de riesgo a la hora de evaluar las consecuencias sobre la salud de la exposición a partículas suspendidas en el aire. De esta manera, cualquier elemento que aporte gran parte de partículas al entorno, como por ejemplo la fracción carbonosa, que constituye el 20-70 por ciento de la concentración de masa, debe ser objeto de gran preocupación.

Algunos estudios epidemiológicos recientes han puesto de manifiesto una asociación estadística entre los aerosoles carbonosos y las visitas al servicio de urgencias cardiovasculares. Con la revelación de evidencias de los efectos que pueden asociarse directamente con la fracción carbonosa, mejorará la capacidad para evaluar la exposición y las consecuencias para las grandes masas de población.

Los aerosoles carbonosos contienen un gran número de especies orgánicas, aunque la mayor parte permanece aún sin identificar. Sin embargo, se ha constatado la presencia de sustancias tóxicas bien conocidas, como por ejemplo hidrocarburos aromáticos oxipolicíclicos y nitropolicíclicos, así como dibenzodioxinas y furanos policlorados. Pero la comunidad científica sigue tratando de resolver el enigma de qué es lo que provoca la toxicidad de los aerosoles presentes en el aire.

En un estudio reciente, McDonald y otros (2004) consiguieron señalar con precisión algunas especies orgánicas particuladas (hopanos y esteranos) a la hora de tratar la toxicidad para los pulmones de muestras de escape de gasolina y combustible diésel. Ese hallazgo ofrece una gran perspectiva de cara a averiguar qué elementos y sustancias integrantes de los complejos aerosoles carbonosos son responsables de que las partículas inhaladas sean tóxicas para el pulmón. Además, respalda los estudios epidemiológicos identificando el tráfico de vehículos como una fuente importante de contamina-

* Científico investigador del Instituto Noruego de Investigaciones Atmosféricas

ción ambiental que puede derivar en mortalidad prematura (Hoek y otros, 2002; Laden y otros, 2000; Metzger y otros, 2004). Finalmente, refuerza el consejo general emitido por la OMS, relativo a que las partículas primarias procedentes de la combustión son especialmente importantes, puesto que "suelen ser ricas en metales de transición y componentes orgánicos, y también cuentan con un área de superficie relativamente amplia". Mientras la comunidad internacional se prepara para entrar en una época en la que los combustibles renovables desempeñarán un papel más importante, debería tenerse en cuenta que la OMS no distingue entre los efectos provocados por las partículas derivadas de la quema de combustibles fósiles y las procedentes de la combustión de biomasa (OMS, 2005).

Los aerosoles carbonosos y los efectos climáticos

A la hora de estudiar el impacto de los aerosoles en el clima, las grandes incertidumbres –con mucha diferencia del resto de factores– están asociadas a los efectos de los aerosoles carbonosos. También es justo señalar que los aerosoles carbonosos son los más importantes actualmente por lo que se refiere a los efectos de los aerosoles sobre el clima, lo que se atribuye principalmente a la parte de carbono negro del aerosol carbonoso, que absorbe la radiación solar presente en la atmósfera. Según Ramanathan y Carmichael (2008), esta característica ha hecho que el carbono negro se convierta en el segundo contribuidor más importante al calentamiento global, únicamente por detrás del dióxido de carbono. Sin embargo, el efecto climático del carbono negro es incierto y sigue debatiéndose (Forster y otros, 2007).

La presencia de concentraciones elevadas de carbono negro en zonas con un alto índice de radiación solar constituye un elemento favorecedor para las denominadas nubes marrones que cubren grandes regiones, como por ejemplo en Asia (Ramanathan y Carmichael, 2008). Las nubes marrones han contribuido al oscurecimiento de la superfi-



NASA <http://modis.gsfc.nasa.gov/>

Imagen MODIS del satélite Terra que incluye los puntos de mayor concentración de incendios (puntos rojos) en la zona occidental de Canadá, el 5 de julio de 2004 a las 19:35 UTC. Los colores grises señalan la presencia de columnas de humo procedentes de los incendios en los bosques boreales.

cie de la Tierra, al calentamiento de la atmósfera y a la perturbación del ciclo hidrológico, afectando posiblemente al monzón.

Tal y como se apuntó en el cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (Forster, 2007), el carbono negro en la nieve tiene un impacto importante sobre el forzamiento radiativo total de la atmósfera al absorber una mayor cantidad de luz solar. Además, el carbono negro depositado sobre la nieve y el hielo podría intensificar la fusión de los glaciares no solo en las altas latitudes septentrionales, sino también en otras regiones no polares como el Himalaya, ocasionando efectos secundarios posteriores por lo que respecta al suministro de agua en las regiones densamente

pobladas que se sirven de los recursos de esta cordillera.

Estos notorios efectos del carbono negro sobre el clima regional y global y su corto período de vida (1 semana \pm 1 semana) en comparación con el dióxido de carbono ha llevado a muchos a la conclusión de que la reducción de emisiones de carbono negro supone la estrategia más eficaz para ralentizar el calentamiento global (Bond, 2007; Hansen y otros, 2000; Jacobson, 2002), mientras que la reducción de los gases de efecto invernadero es necesaria para detener dicho calentamiento. De esta manera, resulta fundamental cuantificar y posteriormente reducir las incertidumbres en los efectos climáticos del carbono negro para así poder elaborar estrategias de disminución eficaces y bien dirigidas.

A este respecto, el mayor conocimiento con el que se cuenta, en relación con las fuentes y las propiedades físicas y ópticas del carbono negro, es particularmente básico para desarrollar procesos de reducción eficaces. En concreto, la utilización de indicadores específicos de fuente, el análisis de radiocarbonos y los espectrómetros de masas relativos al tiempo de vuelo de los aerosoles se han revelado como métodos eficaces a la hora de determinar fuentes de carbono negro.

Cualquier intento encaminado a reducir las emisiones de carbono negro también irá en beneficio de los objetivos de la OMS por lo que respecta a la salud, puesto que ciertos estudios toxicológicos (Donaldson y otros, 2000) han vinculado los efectos adversos para la salud con la exposición al carbono negro. La fracción de carbono orgánico de los aerosoles carbonosos podría incrementar la capacidad de absorción del carbono negro en un factor de 2 a 4 cuando este actúa como revestimiento (Bond y otros, 2006; Fuller y otros, 1999; Jacobson, 2001; Schnaiter y otros, 2005). El aerosol de carbono orgánico también absorbe la radiación ultravioleta debido a la presencia del denominado carbón marrón. Además, los aerosoles de carbono orgánico desempeñan un papel determinado en la formación de gotitas de nube, proceso que en su día se creyó que únicamente se veía afectado por la parte inorgánica del aerosol.

Perspectivas de futuro en relación con los aerosoles carbonosos

La necesidad de comprender la naturaleza de los aerosoles carbonosos será cada vez más importante, en la medida en que se espera que sus emisiones por parte de los países con economías emergentes aumenten drásticamente en el futuro. Además, la importancia relativa de las diferentes fuentes que emiten aerosoles carbonosos a la atmósfera podría cambiar drásticamente en el futuro, ya que estamos tratando de adaptarnos a una sociedad neutra en términos de carbono, sustituyendo los combustibles fósiles por otros

de naturaleza renovable. También se ha especulado con que el cambio climático podría tener un efecto similar mediante el incremento de la formación de aerosoles orgánicos secundarios tras la oxidación atmosférica de los precursores orgánicos en fase gaseosa.

Aunque el cambio a las energías renovables mejorará la situación en lo que respecta al dióxido de carbono, el impacto sobre el nivel de contaminación de las partículas carbonosas en suspensión se presenta incierto. Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2007), cerca del 80 por ciento de las fuentes de energías renovables son de naturaleza combustible, de las cuales el 97 por ciento corresponde a biomasa. Las proyecciones de la Administración de Información de Energía (EIA, 2008) muestran que es probable que el consumo de biomasa (renovables) se incremente en aproximadamente el 200 por ciento entre 2000 y 2020.

Las futuras emisiones de aerosoles carbonosos como consecuencia del esperado aumento en el consumo de biomasa dependerán sobremedida de las tecnologías empleadas para transformar la biomasa en calor y energía. Las predicciones del Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados para el programa "Aire puro para Europa" (CAFÉ) apuntan hacia la calefacción doméstica y, en concreto, a la quema de madera como una de las principales fuentes que pueden contribuir a las futuras cargas de materia particulada y carbono negro en Europa. En amplias zonas del continente europeo, las emisiones procedentes

de la quema de madera para calefacción residencial, o doméstica, no están reguladas, y la combustión tiende a producirse en pequeñas instalaciones con tecnologías obsoletas, favoreciendo así las emisiones de aerosoles carbonosos. Además, el período de renovación para las estufas de madera y chimeneas es bastante prolongado, lo que dificulta el cambio a unas tecnologías nuevas y más limpias.

Varios estudios recientes que se centran en la medición del levoglucosano, un indicador exclusivo de los aerosoles carbonosos procedentes de la combustión de madera, han puesto de relieve que dicha sustancia está presente en el entorno urbano, y también en el medio rural, en un amplio abanico de emplazamientos dentro de Europa, y en concentraciones bastante elevadas. Entre estos lugares se incluyen algunos que no había esperar que estuvieran especialmente influidos por esta fuente. En el caso de las partículas procedentes del humo de la madera, las características físicas y químicas diferirán en función de las condiciones y de los dispositivos de combustión, lo que podría afectar a la toxicidad de las partículas. Sin embargo, el conocimiento actualmente existente con respecto a este tema es muy limitado. Aunque la presencia de levoglucosano en invierno apunta hacia los aerosoles carbonosos de la combustión de madera en el ámbito residencial, la presencia de ese mismo compuesto en muestras recogidas durante el verano se ha asociado con los impactos derivados de los incendios incontrolados y con la quema de desechos agrícolas.

Un problema de emisiones urbanas a nivel relativamente local puede transformarse en una fuente regional de aerosoles carbonosos oxidados y, presumiblemente, de naturaleza hidrófila. Las consecuencias para la salud y los efectos sobre el clima de este material oxidado son, casi con total seguridad, drásticamente diferentes a los originados por las emisiones primarias (Robinson y otros, 2007).

Si bien esta quema de desechos está prohibida en la mayor parte de países de Europa occidental, constituye una práctica habitual en muchas partes del mundo.

Durante los últimos años se han dado muchos ejemplos de emisiones procedentes de incendios incontrolados y agrícolas, que han deteriorado seriamente la calidad del aire en Europa (Saarikoski y otros, 2007; Yttri y otros, 2007), violándose el valor límite de partículas en el aire y produciéndose una elevación de la concentración de aerosoles carbonosos de cerca de un orden de magnitud en algunos casos. También existen ejemplos de cómo han afectado los incendios incontrolados y agrícolas a las concentraciones de agentes contaminantes en el aire de la región ártica (Stohl y otros, 2007), y se ha estudiado si los incendios en los bosques boreales podrían ser la principal fuente de emisión de carbono negro durante el verano ártico en años de gran actividad de incendios (Stohl y otros, 2006; Stohl y otros, 2007).

Ya se ha expresado la preocupación sobre las consecuencias de la conversión a gran escala de gasolina a etanol (bioetanol) por lo que respecta a los correspondientes problemas para la salud relacionados con el ozono. El E85 (85 por ciento de etanol y 15 por ciento de gasolina) puede originar un aumento de los casos de cáncer, mortalidad y número de hospitalizaciones relacionados con el ozono hasta en un 9 por ciento en una ciudad como Los Ángeles, en comparación con el combustible 100 por cien gasolina, según los cálculos de Jacobson (2007).

También se ha mostrado interés por la oxidación de etanol no quemado como fuente de acetaldehído, que es una sustancia cancerígena para los seres humanos. La combustión de los biocombustibles cambiará inevitablemente la composición orgánica del aerosol carbonoso. Aunque los biocombustibles suelen tener un contenido más rico en oxígeno, cabe esperar más especies oxigenadas en las emisiones. Esta fracción del aerosol carbonoso es la menos analizada, en parte debido a las limitaciones analíticas, por lo que este ámbito debe ser sometido a investigaciones adicionales. Los compo-



V. TORRES

En un documento reciente publicado en Nature, Robinson y otros (2007) sugieren que los aerosoles orgánicos secundarios de naturaleza antropogénica también podrían ser más abundantes de lo inicialmente esperado como consecuencia de la oxidación de productos de baja volatilidad que se evaporan de los aerosoles carbonosos primarios con dilución atmosférica. Esto apunta a que la mayor parte de la población está expuesta a los aerosoles orgánicos secundarios, incluso en zonas urbanas.

nentes oxigenados polares son las especies más solubles en agua y, por ende, resultan potencialmente activos como núcleos de condensación para la formación de nubes.

Los últimos progresos en química analítica han ofrecido pruebas de que los aerosoles orgánicos biogénicos secundarios (BSOA) contribuyen de forma sustancial (un 60 por ciento) a la parte orgánica de los aerosoles carbonosos atmosféricos, incluso en los ambientes urbanos (Szidat y otros, 2006). Esto confirma lo que se ha dicho desde hace tiempo: que los aerosoles orgánicos biogénicos secundarios constituyen una de las principales fuentes ausentes de los aerosoles carbonosos. Se ha establecido la hipótesis de que el calentamiento global provoca un incremento en la concentración de aerosoles orgánicos biogénicos secundarios como consecuencia de un aumento en las emisiones de compuestos gaseosos orgánicos y volátiles de naturaleza biogénica que, posteriormente, se oxidan para formar partículas en la atmósfera. Además, la formación de aerosoles orgánicos biogénicos secundarios debería verse impulsada de forma adicional por unas velocidades de reacción dependientes de la temperatura conforme aumenta el calentamiento

global atmosférico. Los argumentos esgrimidos por Robinson y otros (2007) sugieren que los aerosoles orgánicos secundarios de naturaleza antropogénica también podrían ser más abundantes de lo inicialmente esperado como consecuencia de la oxidación de productos de baja volatilidad que se evaporan de los aerosoles carbonosos primarios con dilución atmosférica. Esto apunta a que la mayor parte de la población está expuesta a los aerosoles orgánicos secundarios, incluso en zonas urbanas. Tal y como establecen Robinson y otros (2007): "Un problema de emisiones urbanas a nivel relativamente local puede transformarse en una fuente regional de aerosoles carbonosos oxidados y, presumiblemente, de naturaleza hidrófila. Las consecuencias para la salud y los efectos sobre el clima de este material oxidado son, casi con total seguridad, drásticamente diferentes a los originados por las emisiones primarias". Por regla general, las partículas biológicas de aerosoles primarios han sido ignoradas a la hora de evaluar las fuentes de los aerosoles carbonosos. Sin embargo, algunos estudios recientes han puesto de manifiesto que las partículas biológicas pertenecientes a aerosoles primarios pueden suponer un importante 30 ó 40 por ciento de

la parte orgánica del aerosol carbonoso en regiones moderadamente influidas por las condiciones antropogénicas (Winiwarter y otros, 2008 (a); Winiwarter y otros, 2008 (b); Yttri y otros, 2007). Las partículas biológicas seleccionadas de los aerosoles primarios pueden ser activas tanto como núcleos de condensación de nubes como en forma de núcleos de hielo heterogéneos, y contribuir de este modo a la formación de las nubes. La naturaleza heterogénea de esta fuente hace que resulte complicado predecir cómo se comportará ante el cambio climático.

El proceso de tratar de reducir el calentamiento global disminuyendo las emisiones de carbono negro requiere centrarse en todas las fuentes principales, aunque más concretamente en zonas de especial interés, es decir, en aquellas regiones donde las emisiones de carbono negro tienen un gran efecto sobre el clima. Algunos ejemplos son las economías en desarrollo de Asia, como China y la India, que suman entre un 25 y un 35 por ciento del total mundial de emisiones de carbono negro (Ramanathan y Carmichael, 2008). Otro lugar importante es la zona norte de Eurasia en invierno y primavera, pues esta región es la principal fuente que afecta a las capas bajas de la troposfera de la región ártica (Barrie y otros, 1986; Sharma y otros, 2006; Stohl y otros, 2006). Las emisiones dentro del Ártico propiamente deberían reducirse a un mínimo, puesto que tienen un efecto notable y desproporcionado, aunque este proceso podría resultar complicado, ya que probablemente algunas actividades antropogénicas aumenten conforme retrocede el hielo marino. Una apertura del Paso del Noroeste iría posiblemente acompañada de un aumento de las actividades de navegación, pues se favorecería la búsqueda de petróleo y gas, tal y como ha sucedido en el mar de Barents.

Otro gran desafío podría ser la presencia de incendios en los bosques forestales de Siberia (Federación Rusa), Canadá y Alaska (Estados Unidos), que escapan al control de los seres humanos. El aumento de la frecuencia de estos incendios se ha postulado como una de las consecuencias del calentamiento global, lo que ocasionaría además una ace-

leración en la fusión del hielo marino y de la nieve en la región del Ártico. Durante el grave episodio de contaminación atmosférica que afectó a la zona europea del Ártico en la primavera de 2006 (originado por la quema de productos agrícolas en el este de Europa), Stohl y otros (2007) demostraron perfectamente cómo el calentamiento desproporcionado del Ártico condujo a la aparición de nuevas zonas de las latitudes medias como regiones fuente de la contaminación atmosférica en el Ártico. Este episodio podría servir como alerta temprana de lo que sucedería con una mayor frecuencia en el futuro si el Ártico se calienta más rápidamente que las latitudes medias. Asimismo, también pone de manifiesto la necesidad de prohibir la práctica de quemar desechos agrícolas.

Los residuos de las cosechas constituyen una reserva de energía neutra en lo que respecta al dióxido de carbono que podría añadir un valioso suplemento al consumo energético total; por tanto, la quema en campo abierto supone una pérdida de recursos. Con la población mundial creciendo un 1 por ciento anual durante el período comprendido entre 2005 y 2030 (IEA, 2008), la producción de alimentos y, en consecuencia, los desechos agrícolas, deberían aumentar proporcionalmente lo que podría desembocar en un agravamiento del problema de las emisiones derivadas de la quema de estos desechos. En el caso de Ucrania, que cuenta con los valores europeos más elevados de potencial energético a partir de las cosechas, se ha apuntado que la producción de trigo cuenta con potencial para duplicarse (FAO, 2003; Ericsson y Nilsson, 2006; Sciarre y otros, 2008). Por este motivo, esta es una futura fuente de aerosoles carbonosos nada despreciable.

Durante las últimas décadas, las emisiones antropogénicas en Europa y Norteamérica de amoníaco, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos que no contienen metano se han estabilizado, mientras que las de dióxido de azufre se han reducido notablemente. Esto ha conllevado un aumento relativo de la importancia de los aerosoles carbonosos frente a las especies inorgánicas de los mismos. Un incremento adicional de sustancias carbonosas, ya sea por

el uso de combustibles fósiles o de biocombustibles, o bien como consecuencia de la aparición de incendios más frecuentes en los bosques boreales, aumentará la importancia de disminuir sus fuentes en los años venideros.

¿Cómo podrían las redes de control afrontar el reto planteado por los aerosoles carbonosos que proceden de una multitud de fuentes?

Por regla general, no existe una vigilancia a largo plazo (más de diez años) de los aerosoles carbonosos, aunque hay algunas excepciones (Scharma y otros, 2006). Ello se debe en parte a la ausencia de un enfoque normalizado acerca de cómo deberían llevarse a cabo los procesos de recogida de muestras y su posterior análisis químico. Son muchos los dispositivos que pueden tomar parte durante una toma de muestras de aerosoles carbonosos, y son susceptibles de sobrestimar o subestimar en gran medida la fracción orgánica de los aerosoles; además, existen importantes retos asociados con la separación de la parte orgánica y la de carbono negro y elemental (McDow y Huntzicker, 1990; Schmid y otros, 2001). Por esta razón, los datos procedentes de las diversas redes de control apenas resultan comparables. Actualmente, se está intentando crear en Europa un protocolo unificado para recoger muestras en el entorno rural y analizar químicamente los aerosoles carbonosos con vistas a los "superemplazamientos" conjuntos de la "Vigilancia y la evaluación europeas del transporte de los contaminantes atmosféricos a larga distancia en Europa" y de la Vigilancia de la Atmósfera Global de la OMM a través del proyecto EUSAAR de Superemplazamientos europeos para la investigación de los aerosoles atmosféricos (www.eusaar.org).

En 2008, ninguna red de control de la calidad del aire alcanzaba el nivel de desarrollo necesario para establecer las diferentes fuentes que contribuyen a las concentraciones de aerosoles carbonosos en la atmósfera, o al

menos no de forma continuada. Para conseguirlo ha de ampliarse la especificación de componentes, y tienen que ponerse en funcionamiento instrumentos más sofisticados, tanto en línea como sin conexión. Obviamente, estos requisitos no se ajustan a instrumentos de bajo coste o de fácil manejo, sino que deberían estar orientados a los "superemplazamientos" seleccionados dentro de una red.

Como alternativa, existe la posibilidad de llevar a cabo campañas dedicadas. Este enfoque cuenta con la importante ventaja de que combina los esfuerzos realizados por los grupos de investigación con los efectuados por las agencias internacionales. Un ejemplo reciente lo constituyen las intensas campañas llevadas a cabo por el Programa europeo de vigilancia y evaluación, algunas de las cuales también están localizadas junto con las campañas del proyecto EUCAARI (Proyecto integrado europeo sobre las interacciones de la calidad del clima y del aire, las nubes y los aerosoles). En este caso se han adoptado medidas concretas durante el otoño de 2008 y de cara al invierno/primavera de 2009, con el fin de poder determinar las fuentes de los aerosoles carbonosos. De manera similar, en Norteamérica se están llevando a cabo también intentos para obtener datos a largo plazo. Por desgracia, la cobertura global de los emplazamientos que se encargan de medir los aerosoles carbonosos es muy limitada. En concreto, en las regiones ecuatoriales, en Asia y en las zonas boreales no se han tomado las suficientes muestras. Generalmente, las limitaciones tienen su origen en una falta de competencia interna y en la carencia de finanzas e infraestructuras, aunque si aumentan las posibilidades de financiación para la transferencia de capacidad la situación podría mejorar en los próximos años.

Igualmente, durante los últimos años han mejorado notablemente las posibilidades de análisis. Uno de los avances más importantes ha sido la implantación de varios indicadores (como por ejemplo el ^{14}C , el levoglucosano, la celulosa, los azúcares y los alcoholes de azúcar) en determinados estudios de delimitación de fuentes. El uso continuado de estos marcadores y de instrumentos re-

lacionados con el tiempo de vuelo de los aerosoles mejorará sin duda nuestro conocimiento de los aerosoles carbonosos. Las mediciones relativas a la fase de los aerosoles deberían verse apoyadas por medidas simultáneas de los posibles precursores de los aerosoles carbonosos en fase gaseosa, entre los que se incluyen los compuestos orgánicos volátiles de naturaleza biogénica, los compuestos orgánicos volátiles emitidos antropogénicamente, sus productos de degradación y los compuestos del tipo formaldehídos y glioxales (Simpson y otros, 2007). En el caso de estos últimos, existe incluso capacidad de resolución espacial, lo que permite el suministro de patrones de concentración a nivel regional utilizando un solo instrumento.

Referencias

BARRIE, L.A., 1986: Arctic air pollution—An overview of current knowledge. *Atmos. Environ.*, 20, 643-663.

BOND, T.C., G. HABIB and R.W. BERGSTROM, 2006: Limitations in the enhancement of visible light absorption due to mixing state. *J. Geophys. Res.*, 111, D20211, doi:10.1029/2006JD007315.

BOND, T.C., 2007: Can warming particles enter global climate discussions? *Environ. Res. Lett.*, 2, 045030, doi:10.1088/1748-9326/2/4/045030.

DONALDSON, K., V. STONE, P.S. GILMOUR, D.M. BROWN and W. MACNEE, 2000: Ultrafine particles: mechanisms of lung injury. *Philos. T. Roy. Soc. A*, 358, 2741-2748.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA), 2008: *International energy outlook 2008*. EIA, Washington, DC, USA.

ERICSSON, K. and L.J. NILSSON, 2006: Assessment of the potential biomass supply in Europe using a resource-focused approach. *Biomass Bioenerg.*, 30, 1-15.

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO), 2003: FAOSTAT Agriculture Data. Statistics Division, FAO, Rome.

FORSTER, P., V. RAMASWAMY, P. ARTAXO, T. BERTNSEN, R. BETTS, D.W. FAHEY, J. HAYWOOD, J. LEAN, D.C. LOWE, G. MYHRE, J. NGANGA, R. PRINN, G. RAGA, M. SCHULZ and R. VAN DORLAND, 2007: Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. En: *Climate Change 2007: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (So-

LOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR and H.L. MILLER (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge.

FULLER, K.A., W.C. MALM and S.M. KREIDENWEIS, 1999: Effects of mixing on extinction by carbonaceous particles. *J. Geophys. Res.*, 104, D13, 15941-15954.

HANSEN, J., M. SATO, R. RUEDY, A. LACIS and V. OINAS, 2000: Global warming in the twenty-first century: An alternative scenario. *P. Nat. Acad. Sci. USA*, 97, 9875-9880.

HOEK, G., B. BRUNEKREEF, S. GOLDBOHN, P. FISCHER and P.A. VAN DEN BRANDT, 2002: Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study. *Lancet*, 360, 1203-1209.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), 2007: *Renewables in global energy supply*. An IEA fact sheet. IEA, Paris.

JACOBSON, M.Z., 2001: Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. *Nature*, 409, 6821, 695-697.

JACOBSON, M.Z., 2002: Analysis of aerosol interactions with numerical techniques for solving coagulation, nucleation, condensation, dissolution, and reversible chemistry among multiple size distributions. *J. Geophys. Res.*, 107, 4366, doi:10.1029/2001JD002044.

JACOBSON, M.Z., 2007: Effects of ethanol (E85) versus gasoline vehicles on cancer and mortality in the United States. *Environ. Sci. Technol.*, 41, 4150-4157.

LADEN, F., L.M. NEAS, D.W. DOCKERY and J. SCHWARTZ, 2000: Association of fine particulate matter from different sources with daily mortality in six US cities. *Environ. Health Persp.*, 108, 941-947.

MCDONALD, J.D., I. EIDE, J. SEAGRAVE, B. ZIELINSKA, K. WHITNEY, D.R. LAWSON and J.L. MAUDERLY, 2004: Relationship between composition and toxicity of motor vehicle emission samples. *Environ. Health Persp.*, 112, 1527-1538.

MCDOW, S.R. and J.J. HUNTZICKER, 1990: Vapor adsorption artifact in the sampling of organic aerosol: face velocity effects. *Atmos. Environ.* 24A, 2563-2571.

METZGER, K.B., P.E. TOLBERT, M. KLEIN, J.L. PEEL, W.D. FLANDERS, K. TODD, J.A. MULLHOLLAND, P.B. RYAN and H. FRUMKIN, 2004: Ambient air pollution and cardiovascular emergency department visits. *Epidemiology*, 15, 46-56.

RAMANATHAN, V. and G. CARMICHAEL, 2008: Global and regional change due to black carbon. *Nature Geosci.*, 1, 221-227.

ROBINSON, A.L., N.M. DONAHUE, M.K. SHRIVASTAVA, E.A. WEITKAMP, A.M. SAGE, A.P. GRIESHOP, T.E. LANE, J.R. PIERCE and S.N. PANDIS, 2007: Rethinking organic ae-

- rosols: semivolatile emissions and photochemical aging. *Science*, 315, 1259-1262.
- SAARIKOSKI, S., M. SILLANPÄÄ, M. SOFIEV, H. TIMONEN, K. SAARNIO, K. TEINILÄ, A. KARPPINEN, J. KUKKONEN and R. HILLAMO, 2007: Chemical composition of aerosols during a major biomass burning episode over northern Europe in spring 2006: Experimental and modelling assessments. *Atmos. Environ.*, 41, 3577-3589.
- SCHMID, H., L. LASKUS, H.J. ABRAHAM, U. BALTENSPERGER, V. LAVANCHY, M. BIZJAK, P. BURBA, H. CACHIER, D. CROW, J. CHOW, T. GNAUK, A. EVEN, H.M. TEN BRINK, K.P. GIESEN, R. HITZENBERGER, E. HUEGLIN, W. MAENHAUT, C. PIO, A. CARVALHO, J.P. PUTAUD, D. TOOM-SAUNTRY and H. PUXBAUM, 2001: Results of the "carbon conference" international aerosol carbon round robin test stage 1. *Atmos. Environ.*, 35, 2111-2121.
- SCHNAITER, M., C. LINKE, O. MÖHLER, K.-H. NAUMANN, H. SAATHOFF, R. WAGNER, U. SCHURATH and B. WEHNER, 2005: Absorption amplification of black carbon internally mixed with secondary organic aerosol. *J. Geophys. Res.*, 110, D19204, doi:10.1029/2005JD006046.
- SCIARE, J., K. OIKONOMOU, O. FAVEZ, E. LIAKAKOU, Z. MARKAKI, H. CACHIER and N. MIHALOPOULOS, 2008: Long-term measurements of carbonaceous aerosols in the Eastern Mediterranean: evidence of long-range transport of biomass burning. *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 5551-5563.
- SHARMA, S., E. ANDREWS, L.A. BARRIE, J.A. OGREN and D. LAVOUÉ, 2006: Variations and sources of the equivalent black carbon in the high Arctic revealed by long-term observations at Alert and Barrow: 1989-2003. *J. Geophys. Res.*, 111, D14208, doi:10.1029/2005JD006581.
- SPENCER, M.T., J.C. HOLECEK, C.E. CORRIGAN, V. RAMANATHAN and K.A. PRATHER, 2008: Size-resolved chemical composition of aerosol particles during a monsoonal transition period over the Indian Ocean. *J. Geophys. Res.*, 113, D16305, doi:10.1029/2007JD008657.
- STOHL, A., T. BERG, J.F. BURKHART, A.M. FJÆRAA, C. FORSTER, A. HERBER, Ø. HOV, C. LUNDER, W.W. McMILLAN, S. OLTMANS, M. SHIOBARA, D. SIMPSON, S. SOLBERG, K. STEBEL, J. STRÖM, K. TØRSETH, R. TREFFEISEN, K. VIRKKUNEN and K.E. YTTTRI, 2007: Arctic smoke—record high air pollution levels in the European Arctic due to agricultural fires in Eastern Europe in spring 2006. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 511-534.
- STOHL, A., E. ANDREWS, J.F. BURKHART, C. FORSTER, A. HERBER, S.W. HOCH, D. KOWAL, C. LUNDER, T. MEFFORD, J.A. OGREN, S. SHARMA, N. SPICHTINGER, K. STEBEL, R. STONE, J. STRÖM, K. TØRSETH, C. WEHRLI and K.E. YTTTRI, 2006: Pan-Arctic enhancements of light absorbing aerosol concentrations due to North American boreal forest fires during summer 2004. *J. Geophys. Res.*, 111, D22214, doi:10.1029/2006JD007216.
- STONE, E.A., G.C. LOUGH, J.J. SCHAUER, P.S. PRAVEEN, C.E. CORRIGAN and V. RAMANATHAN, 2007: Understanding the origin of black carbon in the atmospheric brown cloud over the Indian Ocean. *J. Geophys. Res.*, 112, D22S23, doi:10.1029/2006JD008118.
- SZIDAT, S., T.M. JENK, H.-A. SYNAL, M. KALBERER, L. WACKER, I. HAJDAS, A. KASPER-GIEBL and U. BALTENSPERGER, 2006: Contributions of fossil fuel, biomass burning, and biogenic emissions to carbonaceous aerosols in Zürich as traced by ¹⁴C. *J. Geophys. Res.*, 111, D07206, doi:10.1029/2005JD006590.
- WHO [OMS], 2002: *The World Health Report: reducing risks, promoting healthy life*. WHO, Geneva, Switzerland.
- WHO [OMS], 2006: *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005. Summary of risk assessment*. WHO, Geneva.
- WINIWARTER, W., H. BAUER, A. CASEIRO and H. PUXBAUM, 2008(a): Quantifying emissions of primary biological aerosol particle mass in Europe. *Atmos. Environ.*, doi:10.1016/j.atmosenv.2008.01.037 (en imprenta).
- WINIWARTER, W., A. NYÍRI, K. MARECKOVA, R. WANKMÜLLER, H. BAUER, A. CASEIRO and H. PUXBAUM, 2008(b): PM emissions, status 2006. En: *Transboundary particulate matter in Europe. Status report 2008*. Kjeller, Norwegian Institute for Air Research (EMEP Report 4/2008), 35-42.
- YTTTRI, K.E., W. AAS, A. BJERKE, J.N. CAPE, F. CAVALLI, D. CEBURNIS, C. DYE, L. EMBLICO, M.C. FACCHINI, C. FORSTER, J.E. HANSSON, H.C. HANSSON, S.G. JENNINGS, W. MAENHAUT, J.P. PUTAUD and K. TØRSETH, 2007: Elemental and organic carbon in PM₁₀: a one year measurement campaign within the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP). *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 5711-5725.