

Anexo D

INFORME PRELIMINAR* DEL GRUPO DE EXPERTOS AD HOC SOBRE LA BASE DE DATOS DE VERIFICACIÓN DE MODELOS DE TRANSPORTE Y DISPERSIÓN DE LARGO ALCANCE**

Este reporte será presentado al panel de expertos de la OMM CE,
Grupo de Trabajo de la CAS sobre Contaminación Ambiental y Química Atmosférica

10 de noviembre de 1998

***Advertencia.** Este borrador es una versión preliminar de un informe que se está preparando para el Grupo de Trabajo de la CAS (Commission for Atmospheric Sciences, OMS). Una vez presentado y aceptado, el reporte final puede incluir cambios respecto de esta versión. Si bien esta versión es preliminar, la información sobre la disponibilidad potencial de una amplia variedad de experimentos de campo para la validación de modelos de transporte y dispersión de largo alcance era lo suficientemente importante para ser remitida, en una etapa inicial, a la OMM, OMS y organizaciones relacionadas a fin de recibir comentarios e identificar las fuentes de financiamiento. Para mayor información, contáctese con:

[<rdraxler@arl.risc.arl.hq.noaa.gov>](mailto:rdraxler@arl.risc.arl.hq.noaa.gov) o d.hess@bom.gov.au

1. Antecedentes

En la última reunión de la Commission for Atmospheric Sciences (CAS-XII) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) se enfatizó la importancia de la función coordinadora de la OMM en actividades de respuesta ante emergencias, así como el creciente número de modelos para comprender el transporte de contaminantes de largo alcance. La Comisión decidió que era necesario crear una base de datos para todos los experimentos de campo y la información meteorológica correspondiente en un formato común que pudiera usarse para la verificación y desarrollo de modelos. Estados Unidos y Australia convocaron a un grupo reducido de expertos para realizar tareas relacionadas y reportar sus resultados al Grupo de Trabajo sobre Contaminación Ambiental y Química Atmosférica de la CAS.

2. Introducción

Durante los últimos años, el transporte de largo alcance de contaminantes atmosféricos ha recibido considerable atención, lo que se ha manifestado en un número creciente de modelos relacionados. Desde Chernobyl, la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM), a través de sus centros meteorológicos regionales

** Ad Hoc Group of Experts on the Long-range Transport and Dispersion Model Verification Database.

especializados (CMRE), han dado mayor importancia a los accidentes con reactores nucleares. Actualmente, existen ocho centros para diseñar modelos (Toulouse, Bracknell, Montreal, Washington, Melbourne, Tokio, Beijing y Moscú), cada uno con sus propias capacidades para diseñar modelos. En el simposio del European Tracer Experiment (ETEX) se evaluaron 47 modelos. La reciente ratificación del Comprehensive Test Ban Treaty (CTBT) requerirá el uso de modelos de dispersión atmosférica para atribuir las concentraciones de aire medidas a una ubicación específica de la fuente. Existe potencial para desarrollar una nueva clase de modelos relacionados solo con este aspecto. La introducción de motores de propulsión a chorro más efectivos en función del combustible (que funcionan a altas temperaturas) ha incrementado la sensibilidad de los aviones comerciales modernos a la ceniza volcánica producida por las erupciones. Actualmente, la Organización Internacional de Aviación Civil (OACI) está organizando centros para el diseño de modelos de dispersión de ceniza volcánica.

La mayoría, si no la totalidad de modelos de transporte atmosférico (MTA), está relacionada con uno o más modelos operativos de pronóstico meteorológico o con un archivo meteorológico específico, que luego es usado por los MTA. Los datos estimados por los modelos meteorológicos son evaluados y comparados rutinariamente con las normas comunes de rendimiento. Si bien los MTA tienen normas de verificación similares, existen muy pocos datos para realizar estas evaluaciones. Esto se debe quizás a que estos datos son difíciles de obtener y con frecuencia, están limitados a episodios únicos o experimentos controlados (y costosos) en el terreno que no se encuentran disponibles. Sin embargo, existen muchos experimentos aislados, algunos de los cuales son emisiones de trazadores controlados y otros provienen del muestreo de trazas de oportunidad. El problema con muchos de estos datos es que algunos son muy antiguos, los informes son difíciles de localizar y, en el caso de que existan, éstos se encuentran en distintos formatos, y no todos los experimentos archivan los datos meteorológicos correspondientes.

La reciente culminación de proyectos de reanálisis meteorológico en varios centros meteorológicos internacionales permite relacionar datos meteorológicos modernos de óptima calidad con datos provenientes de los experimentos de dispersión. La idea sería crear un conjunto de CD-ROM que contenga datos experimentales, informes relevantes, datos meteorológicos, análisis estadísticos y software en un formato común sin derechos de autor. Esta nueva base de datos común permitiría realizar estudios de sensibilidad y verificación con menor preparación y esfuerzo que los requeridos en la actualidad. Además, cada centro de elaboración de modelos o grupo de investigación podría generar resultados para cada experimento a fin de compararlos con los resultados obtenidos por otros grupos en un simposio de verificación de modelos.

Los objetivos de este informe consisten en sugerir algunas normas comunes para el archivo de datos, revisar qué datos experimentales se deben incluir, elaborar una lista de medidas comunes de rendimiento de los modelos que podrían incorporarse a la base de datos y estimar su costo, proponer compañías o laboratorios potenciales de investigación para realizar el trabajo y quizás identificar posibles fuentes de financiamiento.

3. Estándares para los datos

Existen tres fuentes primarias de datos:

- 1) información sobre la descarga de contaminantes;
- 2) datos meteorológicos usados para calcular el transporte y la dispersión de contaminantes, y
- 3) valores de los contaminantes medidos que pueden ser comparados con los resultados del modelo.

Todas estas fuentes deben estar en un formato común a fin de poder configurar cualquier simulación experimental y generar resultados de manera rápida. Deben existir ciertos requerimientos mínimos para la inclusión de experimentos en la base de datos, según el tipo de experimento, información o medidas adoptadas.

3.1 Datos meteorológicos

Es importante que los datos meteorológicos usados en los experimentos de dispersión no solo tengan un mismo formato sino que, además, provengan de la misma fuente. La fuente común de cuadrículas de campos, obtenida con mayor facilidad, provendría de uno de los proyectos de reanálisis meteorológico. Un reanálisis incluye la recuperación de datos obtenidos de la superficie, a través de sonda radioviento, pibal, aviones, buques, satélites y otros datos, y supone el control de calidad y la asimilación de estos datos en un sistema que se mantiene invariable mientras dure el proceso. Ello elimina omisiones asociadas con los cambios en este sistema y desarrolla un modelo de pronóstico meteorológico para producir las series de tiempo de las cuadrículas de campos meteorológicos.

Si un experimento de dispersión hubiera archivado observaciones especiales, estas podrían incluirse en la base de datos principal. Cada experimento de dispersión debería incluir solo un subconjunto limitado de datos del reanálisis (suficiente para realizar los cálculos requeridos) a fin de limitar el volumen de datos y garantizar acuerdos con centros meteorológicos que requieran datos sin restricción. El conjunto total de datos estaría disponible en el centro original. Es posible que estas cuadrículas de campos meteorológicos sean solo una versión de la “verdad” y que por consiguiente, puedan modificarse o procesarse previamente para respaldar diversos estudios de investigación o elaboración de modelos. Sin embargo, es lo mejor que se puede hacer con respecto a la exhaustividad de los procedimientos de reanálisis y dentro de las limitaciones presupuestarias del proyecto.

Una vez identificados los experimentos que se van a incluir, se puede obtener un volumen estimado de datos. No obstante, para propósitos de planificación, se puede suponer que se usarán datos del reanálisis de NCEP (NOAA)/NCAR. Los campos están disponibles en una cuadrícula gaussiana (2,5 grados) en 28 niveles sigma. Si las variables (5 en total) se archivan en todos los niveles del modelo y se comprimen en formato Grib (aproximadamente 2 bytes por punto de datos) en 4 campos diarios, los requerimientos de espacio serían 12 megabytes por día (o solo 50 días por CD). Debido a que algunos experimentos de dispersión duran varios meses, se requiere una subcuadrícula correspondiente al dominio experimental para reducir el volumen de datos. El dominio racional más grande sería un cuarto de hemisferio (90° latitud, 90° longitud), lo que reduce los requerimientos de datos meteorológicos a aproximadamente 1 megabyte por día. Si

los dominios experimentales se restringieran posteriormente a 1.500 km, los volúmenes de datos se reducirían a 10 kilobytes por día. En todo caso, los datos del reanálisis deben procesarse, es decir, descomprimirse, y el dominio experimental deberá extraerse y luego recomprimirse. Entre los aspectos que pueden resolverse durante la preparación de la propuesta final está el formato en que deberán estar los datos meteorológicos: Grib, NetCDF o quizás otro.

Algunos experimentos (por ejemplo, ETEX, CAPTEX y quizás algunos pocos más) pueden requerir una resolución mayor que 2,5 deg para capturar adecuadamente los efectos de mesoescala identificados por los investigadores que trabajan con esos datos. Normalmente, se esperaría que esas resoluciones fueran de 1 deg. De esta manera, los costos asociados con el factor adicional del volumen de 6 datos deberían tratarse entre los detalles de la propuesta final.

3.1.1 Proyecto de reanálisis NCEP/NCAR (1958-1997)

El proyecto de reanálisis NCEP/NCAR es una iniciativa conjunta de los National Centers for Environmental Prediction (NCEP, antes “NMC”) y el National Center for Atmospheric Research (NCAR). El objetivo de este esfuerzo conjunto era producir nuevos análisis atmosféricos mediante el uso de datos históricos y el análisis del estado atmosférico vigente (Sistema de Asimilación de Datos Climáticos, SADC). Si bien el resultado no cuenta con derechos de autor, se han establecido tarifas nominales para copiar datos de los archivos del NCAR (Boulder Co. Estados Unidos) y CDC (Boulder Co. Estados Unidos). La asimilación de datos y el modelo usado son idénticos al sistema global implementado el 11 de enero de 1995 en el NCEP, excepto que la resolución horizontal es T62 (aproximadamente, 210 km). Varias fuentes de observación brindadas por diferentes países y organizaciones, y que no están disponibles en tiempo real, han ampliado la base de datos. Referencia: Kalnay y otros, Bull AMS, 1996, 77, 437-471 y <http://wesley.wwb.noaa.gov/reanalysis.html>

3.1.2 Proyecto de reanálisis ECMWF

El archivo de reanálisis ECMWF (ERA) contiene análisis globales y predicciones de corto alcance sobre todos los parámetros climáticos relevantes desde 1979, año en que se realizó el primer experimento GARP (FGGE) a escala mundial. Los servicios de datos ECMWF pueden brindar información sobre qué años están disponibles. El modelo de resolución completa para el ERA es el Spectral T106, N80 gaussiano (equivalente aproximadamente a 1,125 grados de latitud/longitud) con 31 niveles de modelos híbridos en la vertical. Además, los datos del aire superior están disponibles en 17 niveles de presión. Todos los datos se encuentran en el formato estándar internacional GRIB. El proyecto ECMWF tiene limitaciones de derechos de autor y costos significativos de acceso. Además, aún no está claro si se puede llegar a acuerdos convenientes sobre la distribución limitada de un subconjunto de estos datos. Referencia: <http://www.ecmwf.int/data/era.html>

3.1.3 Otros datos meteorológicos

Actualmente, la oficina de asimilación de datos (DAO) del Goddard Space Flight Center de la NASA (Maryland, Estados Unidos) está elaborando una cuadrícula de datos atmosféricos globales de varios años para investigaciones climáticas, lo que incluye aplicaciones químicas en

la troposfera. Los datos, que estarán disponibles para la comunidad científica, son adecuados para investigaciones climáticas ya que son producidos por un sistema de asimilación fija diseñado para minimizar la rotación del ciclo hidrológico. Esta asimilación produce una cuadrícula de datos de 2 x 2,5 latitud/longitud por 20 niveles en intervalos de 6 y 3 horas. Los datos incluyen altura del aire superior, vientos, temperatura y humedad, así como varias cantidades derivadas tales como calor radiactivo, precipitación, humedad de la tierra, etc. Referencia: Schubert y otros, 1993, Bull. Amer. Meteor. Soc., 74, 2331-2342. Véase <http://hera.gsfc.nasa.gov/experiments/assim54A.html>

3.2 Emisiones de la fuente

Cada experimento debe incluir, por lo menos, la ubicación (grados decimales) y altura de la descarga, así como la cantidad de contaminantes descargados (kg) en función del tiempo (UTC). Algunos episodios accidentales (como las erupciones volcánicas) pueden contar con muy poca información documentada sobre descarga, excepto el tiempo inicial y la localización. Sin embargo, estos episodios pueden brindar estadísticas valiosas sobre el rendimiento del modelo con respecto a direcciones de transporte de contaminantes o estimados cuantitativos de las concentraciones. Otros detalles posibles de la fuente deberían ser la naturaleza y la especie de la traza o contaminante: si es pasivo, si es soluble, su vida media, así como información sobre los niveles de fondo en la atmósfera. Si las cantidades de la emisión en función del tiempo, ya se conocen, esta información se puede guardar en un simple archivo ASCII, con un registro para cada periodo de emisión, con información sobre el tiempo de inicio, el de finalización, la altura y la cantidad. Todos los campos deben estar delimitados, de manera que se puedan usar fácilmente en otros programas o aplicaciones en hoja de cálculo.

3.3 Información sobre el muestreo

El muestreo de contaminantes puede consistir en una foto instantánea como una foto de satélite, o representar promedios temporales en un lugar fijo, o un promedio espacial como una muestra tomada desde el aire. La recolección de distintas muestras, sin considerar la plataforma, comparte algunas de las características de los datos (altura, ubicación, tiempo, duración, etc.) mientras que las fotos de satélite son un producto único para la verificación de modelos y su interpretación puede ser subjetiva debido a los diferentes tipos de información que se pueden obtener de los datos. En esta área pueden surgir problemas.

Si bien la consistencia es muy importante, no está claro si se la puede alcanzar en un 100 %. Las normas deben establecerse cuando los ceros sean significativos y se incluyan en el archivo. Algunos experimentos pueden reportar hasta 80-90% de las observaciones como ceros si se encuentran lejos del centro de la pluma. La falta de información se debe diferenciar de las lecturas que arrojan cero.

3.3.1 Muestras de plataforma fija o móvil

A pesar de la redundancia, cada muestra debe identificarse en un registro único que contenga datos sobre la fecha, el tiempo, la ubicación, la altura y la concentración a fin de mantener cierta consistencia en el formato entre las plataformas de muestreo. De esta manera, las ubicaciones

fijas de muestreo en el terreno y las muestras recolectadas desde el aire se pueden combinar en una sola base de datos.

3.3.2 Fotos de satélite

Existen varios problemas asociados con el uso de fotos de satélite: la posibilidad de recuperarlas desde los archivos, la existencia de canales múltiples, el gran volumen de datos por fotografía y la interpretación cuantitativa de las dimensiones de la nube de contaminantes. Todas las imágenes se deben convertir a una proyección geográfica estándar que pueda correlacionarse fácilmente con los resultados del modelo. Por lo general, estos datos solo se usan para verificar erupciones volcánicas y humos de incendios de gran escala. Aún existe mucha incertidumbre con respecto al uso de estos datos. Por ejemplo, ¿cómo se cuantifican y comparan los resultados del modelo con las imágenes?, ¿cómo se define el límite de la imagen en los modelos?, ¿se deben procesar las imágenes de satélite y archivar solo los vectores que definen la pluma? Aún no está claro si existe consenso para crear una base de datos uniforme a partir de estas imágenes. Si bien resulta tentador descartar el archivo de satélite por las complicaciones que supondría para las primeras fases de este proyecto, la totalidad de episodios que se puede simular y la relevancia y singularidad de los datos para la industria de la aviación sugieren que quizás se deba considerar el desarrollo de una verificación correspondiente a través de archivos de satélite. Los nuevos satélites en órbita brindarán medidas más cuantitativas del aerosol y podrían ofrecer suficiente información complementaria para usar adecuadamente los archivos antiguos.

3.3.3 Datos no convencionales

En algunos experimentos reportados, solo se dispone de datos derivados tales como el ancho de la pluma en función de la distancia, en lugar de concentraciones de aire. Otros datos pueden ser la precipitación, que puede derivarse de diversos métodos de medición y durante distintos periodos de acumulación en cada punto. Estos experimentos deberían evaluarse caso por caso para determinar su inclusión en el archivo mayor.

4. Bases de datos experimentales potenciales

La base de datos solo debe incluir experimentos donde la distancia de transporte desde la fuente hasta la mayoría de sitios de muestreo sea mayor que 200 km. Este es el rango donde existe una transición desde el control de dispersión de las capas límites planetarias hasta la influencia sinóptica 2-D a gran escala sobre la dispersión. Si bien una base de datos de verificación a mesoescala sería de gran utilidad en el futuro, ya que muchos modelos de transporte de largo alcance se extienden con éxito a mesoescalas, esta base de datos requeriría sin duda un considerable trabajo adicional debido al gran número de experimentos desarrollados en esa escala. Actualmente, H. Olesen está construyendo una base de datos similar para experimentos de muy corto alcance en RISO (tales como Kincaid, Copenhagen, Lillestrom e Indianapolis). A medida que esta propuesta avanza hacia la etapa de diseño, los dos esquemas deben consultarse a fin de beneficiarse del desarrollo de ambos en términos de estándares de datos, métodos estadísticos y bibliografía.

Se deben establecer guías para determinar los datos que deben incluirse en este archivo. Por lo general, existen tres tipos de experimentos:

- 1) experimentos controlados en los que se conoce la tasa de descarga de contaminantes;
- 2) experimentos accidentales en lo que se desconoce (y nunca se conocerá) esa información, por ejemplo, erupciones volcánicas, y
- 3) experimentos de transporte tales como emisiones de globos aerostáticos.

El grupo controlado incluiría episodios tales como el accidente de Chernobyl, donde la fuente se reconstruyó luego del hecho. Los experimentos controlados brindan datos cuantitativos sobre concentración y precipitación. Sin embargo, cada experimento presenta diferentes limitaciones, generalmente relacionadas con la cantidad de muestras analizables. Con frecuencia, los experimentos con una resolución espacial y temporal detallada se limitan a unos cuantos casos. Los que abarcan muchos episodios tienen una baja resolución espacial o temporal de muestreo. Cada experimento puede servir para un propósito distinto de verificación o elaboración de modelos. Las emisiones accidentales descontroladas como las erupciones volcánicas, pueden presentar pocos o ningún dato cuantitativo de muestreo, pero aun así tener un gran historial temporal de imágenes fotográficas de satélite sobre las posiciones de la pluma.

A continuación, se presenta un resumen de experimentos potenciales, conocidos por los miembros del grupo de trabajo. Cada experimento contiene referencias y datos disponibles. Asimismo, existe un considerable número de experimentos, menos conocidos por este grupo, que debe revisarse. Las etapas iniciales del diseño de la base de datos deben incluir una búsqueda bibliográfica integral, cuyos resultados se incorporen a la base de datos sin considerar si los experimentos individuales sean incluidos o no.

4.1 Experimentos controlados en el campo

4.1.1 Estados Unidos, Idaho, Kr-85, 1974

Tres meses de emisiones de Kr-85 y un muestreo de 12 horas continuas en 13 ubicaciones en una línea de aproximadamente 1.500 km a sotavento. Limitaciones: muchas muestras cercanas al nivel de fondo y su variabilidad es comparable con la señal. Ventaja: la serie continua de tiempo muestra pocas plumas distintivas y únicas ya que el transporte se dio a través de las Montañas Rocosas. Datos disponibles: solo en publicación. Referencia: *Atm. Environ.*, 1982, 16: 2763-2776.

4.1.2 Estados Unidos, Oklahoma, PFT, 1980

Una sola emisión del trazador de perfluorocarbono (PFT) durante tres horas, con muestras de tres horas de duración en cerca de 40 sitios en 600 km a sotavento de la emisión. En tres ubicaciones de hasta 2.000 km a sotavento, se midió un trazador adicional de metano pesado (HM, Heavy methane: $^{12}\text{CD}_4$ y $^{13}\text{CD}_4$), emitido simultáneamente con el PFC. Limitaciones: episodio único con emisiones en condiciones predefinidas. Ventaja: historial temporal y espacial detallado a medida que la pluma pasa el área de muestreo de 600 km, bajo condiciones únicas de corriente

de chorro nocturna y concentraciones máximas de trazadores secundarios. Datos disponibles: solo en publicación. Referencia PFC: Tech. Report EPA-600, con copia en:

<ftp://www.arl.noaa.gov/pub/tracer/captex>

Referencia HM: M.M. Fowler y S. Barr, 1983, *Atm. Environ.*, 17:1677-1685.

4.1.3 Estados Unidos, CAPTEX, PFT, setiembre y octubre de 1983

El Cross Appalachian Tracer Experiment consistió en seis emisiones de PFT durante tres horas, independientes una de otra, cuatro de Dayton, Ohio y dos de Sudbury, Ontario, Canadá. Las muestras fueron recolectadas aproximadamente en 80 sitios, ubicados a 300 y 800 km de la fuente, generalmente cada seis horas durante 48 horas por cada emisión. Ventajas: disponibilidad de múltiples muestras tomadas desde el aire para muchas emisiones a distintas distancias a sotavento. Datos disponibles: <ftp://www.arl.noaa.gov/pub/tracer/captex>. Referencia: NOAA Tech Memo ERL ARL-142.

4.1.4 Ucrania, accidente de Chernobyl, abril de 1986

Una emisión de 10 días de duración con mediciones extensas de la concentración y precipitación del aire. Limitaciones: aún existen controversias con respecto a emisiones reconstruidas y existe poca información sobre la precipitación diaria con la lluvia de Cs-137. Ventaja: son los únicos datos que contienen mediciones extensas de las concentraciones del aire y de la precipitación radiactiva con la lluvia y en partículas acumuladas, con mayor cantidad de datos disponibles ahora que cuando se publicó la mayoría de los estudios iniciales. Datos disponibles: concentraciones de Cs-137 e I-131 en el aire, y precipitación diaria y acumulada de Cs-137 disponibles en el banco de datos de REM en JRC Ispra: <http://java.ei.jrc.it/>. Referencia: Klug y otros, *Evaluation of long-range atmospheric models using environmental radioactivity data from the Chernobyl accident*, EUR 14148 EN, Elsevier, 1992, ISBN 1-85166-766-0.

4.1.5 Estados Unidos, ANATEX, PFT, enero-marzo de 1987

El Across North America Tracer Experiment consistió en el muestreo de 66 emisiones de PFT (dos grupos de 33, en dos ubicaciones distintas) cada dos días y día y medio, respectivamente. Se recolectaron muestras de aire durante periodos de 24 horas en cerca de 60 sitios que abarcaban gran parte del este de los Estados Unidos y el sudeste de Canadá. El muestreo desde el aire se limitó a unos cuantos cientos de kilómetros de las fuentes. Limitación: la resolución temporal y espacial es deficiente. Ventaja: varias plumas distintivas de trazadores se mueven a través de la red de muestreo bajo diferentes condiciones meteorológicas. Datos disponibles: <ftp://www.arl.noaa.gov/pub/tracer/anatex>. Referencia: NOAA Tech Memos ERL ARL-165, 167, 175 y 177.

4.1.6 Estados Unidos, Sudoeste de Mohave, PFT, 1992

Emisiones continuas durante dos periodos de un mes (verano e invierno). Muestreo diario en varias ubicaciones en terrenos complejos dentro de un área de varios cientos de kilómetros.

Datos disponibles: [ftp://eafs.sage.dri.edu/currproj/mohave](http://eafs.sage.dri.edu/currproj/mohave). Referencias: contáctese con Mark Green (green@sncs.dri.edu).

4.1.7 Europa, ETEX, PFT, 1994

Dos emisiones de PFT con un muestreo de tres horas en 167 ubicaciones a 2.000 km de la fuente durante tres días. Limitación: solo un número limitado de mediciones está disponible para la segunda emisión, que ocurrió durante un paso frontal. Ventajas: se dispone de mediciones de trazadores desde el aire, si bien aún no se han evaluado de manera exhaustiva. Datos disponibles: en <http://www.ei.jrc.it/etex/>. Referencias: publicaciones EUR en elaboración, presentadas como edición especial de Atm. Environ.

4.1.8 Estados Unidos, costa del Atlántico central, ACURATE, Kr-85, 1982-1983

El experimento ACURATE consistió en medir las concentraciones de criptón-85 en el aire, dicho experimento fue producido por las emisiones de la planta del río Savannah, Carolina del Sur. Las concentraciones promedio en el aire se recolectaron dos veces al día (12 horas), durante 19 meses (marzo de 1982 a setiembre de 1983) en cinco ubicaciones a lo largo de la costa este de los Estados Unidos a una distancia de 300 y 1.000 km de la planta. Limitación: el experimento solo se realizó en cinco puntos, de los cuales solo uno o dos mostraban señales por encima del nivel de fondo. Ventaja: es el único experimento que comprende las cuatro estaciones y donde 750 de 3.858 muestras presentan señales por encima del nivel de fondo. Datos disponibles: <ftp://www.arl.noaa.gov/pub/tracer>. Referencia: NOAA Tech Memo. ERL ARL-130.

4.1.9 Australia, Monte Isa, pluma de SO₂, 1979-1981

Mediciones realizadas por la Division of Coal and Energy Technology, CSIRO. Datos disponibles: john.carras@syd.dcet.csiro.au. Referencias: Carras y Williams, 1981, Atm. Environ., 15:2205-2217 y 1988, Atm. Environ., 22:1061-1069.

4.1.10 Inglaterra, experimento en el Mar del Norte

El transporte de SF₆ de una estación de energía del sur de Yorkshire a través del Mar del Norte. Referencias: A.S. Kallend y J. Crabtree, "The fate of atmospheric emissions along plume trajectories over the North Sea; Final Report". Leatherhead: Central Electricity Research Laboratories TPRD/L 2340/R82, 1983 y J. Crabtree en la 13ª Conferencia OTAN/CCMS (1982) y J. Crabtree en Air Pollution Modelling and its Applications III, Plenum Press, pp. 129-138.

4.1.11 Inglaterra, accidente de Windscale, 1957

Referencias: J. Crabtree, "The travel and diffusion of the radioactive material emitted during the Windscale accident", Q. J. Roy. Met. Soc., 85 (362), 1959; A.C. Chamberlain, "Deposition of iodine-131 in Northern England in October 1957", Q. J. Roy. Met. Soc., 85 (350), 1959; J. Gray y otros, "Discharges to the environment from the Sellafield site 1951-1992", J. Rad. Prot., 15(2), 1995.

4.1.12 Europa, experimentos TRACT-TRANSALP, 1989-1992

El experimento TRACT está relacionado con el transporte a mesoescala de contaminantes a cientos de kilómetros de distancia. El TRANSALP consistió en tres campañas en la parte central de los Alpes. Solo en el tercer experimento TRANSALP (1991), se liberó el trazador (PFC) del extremo norte del lago Lucerna y se midió a distancias mayores de 100 km hasta el lago Maggiore en Italia. En las otras dos campañas (1989, 1990), el intervalo de distancias fue considerablemente menor (40 km). También se realizaron mediciones desde el aire. Datos: banco de datos del experimento disponible en JRC Ispra a solicitud del Dr. G. Graziani (giovanni.graziani@jrc.it). Referencia: Special Issue on Transport of Air Pollutants over Complex Terrain (TRACT), *Atm. Environ.*, Vol. 32, abril de 1988, pp 1141-1352.

4.1.13 Europa, experimento de Oeresund, 15 de mayo al 14 de junio de 1984

Durante la campaña se realizaron nueve experimentos con trazadores. En cada uno de ellos, el trazador (SF6) se emitió cerca de la costa con el viento en contra y se realizó un muestreo en el Oeresund, a sotavento de la línea costera y otras tierras interiores. Datos: banco de datos del experimento disponible en Risoe, Dr. S.E. Gryning, sven-erik.gryning@risoe.dk. Referencia: The Oeresund Experiment Data Bank, ISBN 87-550-1592-1.

4.1.14 Océano Antártico, junio y octubre de 1984

Cuatro emisiones (enero, junio y octubre) de metano pesado desde el aire y muestreo de tres días en ocho ubicaciones en el nivel del terreno hasta 60 días después de la emisión. Durante este periodo, los muestreos desde el aire fueron limitados. Ventaja: un solo ambiente para el transporte y dispersión en invierno y verano. Limitación: no se analizaron todas las muestras para reducir el costo del experimento. Datos: cuadros de datos suplementarios en microficha disponibles en AGU. Referencia: E.J. Mroz y otros, 1989, *J. Geophys. Res.*, 94(D6), 8577-8583.

4.2 Emisiones no controladas (generalmente, solo se dispone de datos de satélite)

Con respecto a estos episodios, existen quizás más preguntas que respuestas. En efecto, los incendios de maleza y las erupciones volcánicas se deben tratar por separado. Se debe estimar la altura de las emisiones a partir de los archivos de satélite. Es importante distinguir entre nube y ceniza. Los distintos episodios tendrán diferentes ciclos de vida, durante los cuales se puede diferenciar la pluma del nivel de fondo. La resolución de las imágenes dependerá del momento en que ocurran los episodios, es decir, durante el día, cuando se cuenta con imágenes VIS de mayor resolución, o durante la noche, cuando se dispone de rayos infrarrojos. Las imágenes IR se deben procesar para obtener las temperaturas de brillantez y, de esta manera, la altura aproximada de las emisiones. La frecuencia de archivo de imágenes (para reducir los requisitos de almacenamiento) se debe determinar según la evolución temporal de la pluma.

4.2.1 Estados Unidos, erupción del monte St. Helens, 1979

Durante el episodio se realizaron observaciones terrestres y de satélite. Referencias: imágenes de satélite de la nube del monte St. Helens disponibles en Holasek y Self (1995) "GOES weather

satellite observations and measurements of the May 18, 1980, Mt. St. Helens eruption”, Journal of Geophysical Research 100: 8.469-8.487, <http://www.geo.mtu.edu/eos/ppages/self.htm>; además, J. Crabtree y M. Kitchen, Atm. Environ., Vol. 18, N°. 6, 1984.

4.2.2 Filipinas, erupción del monte Pinatubo, 1991

Referencias: Holasek RE, S Self y AW Woods (1996) Satellite observations and interpretation of the 1991 Mount Pinatubo eruption plumes. J. Geophys. Res. 101: 27635-27655.

4.2.3 Kuwait, pluma de humo originada por incendio petrolero, 1991

Referencia: J.T. McQueen y R.R. Draxler, 1994, Atm. Environ., 28:2159-2174; K.A. Browning y otros, Nature, mayo de 1991, 351, 363-367.

4.2.4 Episodios recientes

Si bien algunos de los episodios más recientes aún no han sido documentados en la bibliografía, se pueden obtener imágenes de los archivos de satélite. Estos episodios incluyen la erupción del Rabual de Papúa Nueva Guinea (1994) y del Ruapehu de Nueva Zelanda (1996), los humos del incendio de maleza del Kalimantan, Sumatra, Irian Jaya, Papúa Nueva Guinea (1997), y la nube de polvo de China (abril de 1998).

4.3 Otros datos de experimentos potenciales

Los datos obtenidos a partir de vuelos en globos aerostáticos permiten examinar un modelo solo en cuanto al componente relativo al transporte, pero no en el componente referido a la dispersión. Sin embargo, además de la posición del globo, se debe conocer la altitud, que usualmente se tabula con experimentos controlados con globos aerostáticos para varios proyectos de investigación tales como el experimento ACE-1 cerca de Tasmania en 1994 (J. Geophys. Res., 1988, 103:16,297-16,758), los viajes en globo aerostático de Smith/Kavanagh en Australia en 1993 (Mills y otros, 1994, Aust. Met. Mag., 43:29-39), el vuelo de Fossett sobre el Pacífico en febrero de 1995 (Weather and Forecasting, 1996, 11:111-114), la carrera europea de globos aerostáticos (K. Baumann y A. Stohl, 1997, J. Appl. Meteorol., 36:711-720) y algunas emisiones de tetroon en la parte central de los Estados Unidos (W.A. Hoecker, 1977, J. Appl. Meteorol., 16:374-383). También podrían sumarse a la lista los vuelos recientes en globo aerostático sobre el Atlántico norte y sur realizados por Fossett así como el reciente experimento ACE-2, una vez que los datos estén disponibles. Cabe señalar que no todos los experimentos con globos aerostáticos cuentan con datos detallados sobre la altura tales como los 190.000 pequeños globos de helio liberados en mayo de 1986 sobre todo el territorio de Estados Unidos, de los cuales se encontraron 8.000 y cuya posición final se reportó (R.A. Stocker y otros, 1990, J. Appl. Meteorol. 29:53-62).

5. Requisitos del procesamiento de datos

Por lo general, los requisitos de espacio de los datos de muestreo serán mínimos comparados con los campos de datos meteorológicos que acompañarán cada experimento. Se requerirá cierto esfuerzo para digitalizar los datos que no se encuentren en formato digital y reformatear los que ya lo estén. Los cálculos de espacio para datos meteorológicos (presentados a continuación) son bastante modestos para campos de baja resolución (2,5 deg) y razonables para datos de alta resolución (1 deg), ya que por lo menos el conjunto de los principales experimentos realizados con trazadores deben caber en un CD de 640 megabytes.

Experimento	Dominio Latitud x longitud	Periodo días	Baja resolución Megabytes	Alta resolución Megabytes
Idaho	30 x 40	90	15	60
Oklahoma	20 x 30	5	1	5
CAPTEX	15 x 25	20	1	5
ACURATE	15 x 15	570	15	75
Chernobyl	40 x 60	30	10	40
ANATEX	30 x 60	90	20	80
Mohave	10 x 20	80	2	10
ETEX	30 x 40	5	1	5
Total			65	275

Si bien aún no se sabe qué efecto tendría el incorporar datos de satélite, la adición de un CD o más no reduciría la aplicación práctica del archivo. El mayor costo que supondrían estos datos sería el procesamiento requerido para estandarizar las imágenes.

6. Análisis estadístico y software de presentación

El paquete estadístico podría presentarse en dos versiones. La primera, que posiblemente ya esté disponible para muchos investigadores, consistiría en un software de propiedad común (por ejemplo, IDL, SAS, gráficos NCAR, etc.) e incluiría algunas rutinas gráficas; en segundo lugar, una versión sin derechos de autor que permitiría a los encargados de elaborar modelos analizar y mostrar los resultados en un formato común a fin de facilitar la comparación entre modelos. Esas versiones pueden ser programas precompilados para computadoras personales con Windows o para el código de fuente "C" o Fortran, que podrían compilarse en estaciones de trabajo Unix. Los recientes avances en la comparación de modelos estadísticos, especialmente los datos ETEX, han demostrado que la evaluación de modelos podría avanzar de los métodos pareados de tiempo y estación a enfoques que comparen patrones temporales y espaciales.

7. Lineamientos del plan de trabajo

En este momento, no se sabe dónde ni cómo elaborar la base de datos. Es posible estimar los costos requeridos para completarla. Tal vez, se pueda conseguir apoyo de algún gobierno, laboratorio de investigación o contratista. Se requiere supervisión científica. A continuación, se

sintetizan de manera general las tareas necesarias, con un estimado bruto del esfuerzo hombre-meses para cada componente, algunos de los cuales podrían realizarse en forma paralela.

7.1 Elaboración del plan de trabajo final por el equipo del proyecto

Esta etapa incluiría resultados de búsqueda bibliográfica integral para experimentos adecuados, especificaciones técnicas finales y aspectos financieros. Esfuerzo: tres meses.

7.2 Desarrollo de un formato electrónico estándar

Esta tarea supondría encuadrar los diferentes datos experimentales y los programas de aplicación específicos para cada grupo de ellos a fin de crear un producto con un formato común. Si las copias digitales de los datos no están disponibles, se deberán transcribir los resultados publicados en un formato electrónico. Esfuerzo: seis meses.

7.3 Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos que corresponden al dominio espacial y al periodo del experimento se deben obtener de uno de los proyectos de reanálisis y luego, extraerse y recomprimirse en un formato común para todos los experimentos. Esfuerzo: seis meses.

7.4 Datos de satélite

Los datos de satélite brindarán imágenes principalmente destinadas a la verificación cualitativa en esta etapa. Dentro de muy poco tiempo, será posible verificar cuantitativamente el transporte y la dispersión de aerosoles con el lanzamiento de instrumentos de POLDER, TOMS, OCTS, MODIS y MISR. Sin embargo, deben existir por lo menos tres imágenes por episodio, incluidas imágenes VIS, para una mayor resolución (cuando ello sea posible), e IR para temperaturas. La resolución debe ser suficiente para obtener información sobre la posición de la pluma, sin alterar el volumen de almacenamiento. Esfuerzo: nueve meses.

7.5 Lineamientos

Brindar guías a los encargados de elaborar modelos para que presenten sus resultados en un formato estándar. Ingresar los análisis estadísticos y usar software de presentación para acceder a datos de experimentos y modelos. Asimismo, proveer un software ejecutable en una plataforma común (es decir, computadoras personales con Windows) o un código determinado ("C" o Fortran), que pueda recopilarse y ejecutarse en los centros de elaboración de modelos. Esfuerzo: seis meses.

7.6. Copias de CD

Obtener varias copias de CD y distribuir las a un público numeroso, quizás junto con un artículo en un importante periódico internacional. La OMM auspiciaría e invitaría, a través de este artículo a un simposio de verificación de modelos. Esfuerzo: seis meses.

8. Fuentes de financiamiento

La OMM debe distribuir este informe con las recomendaciones del grupo de trabajo de la CAS sobre contaminación ambiental y química atmosférica a la IAEA, ICAO y otras instituciones nacionales e internacionales interesadas en el transporte de contaminantes de largo alcance. En cuanto a las fuentes de financiamiento, es necesario identificar quién va a realizar el trabajo, lo cual puede simplificar este problema. Por ejemplo, el financiamiento sobre Acciones de Costos Compartidos de EC DG XII (Ambiente y Clima), que se iniciará el próximo año. Si se identifica una fuente importante de financiamiento, quizás otros estén más dispuestos a contribuir con la culminación del proyecto.

9. Miembros del grupo de expertos

Roland R. Draxler
Air Resources Laboratory, NOAA, Silver Spring, MD, Estados Unidos
rdraxler@arl.risc.arlhq.noaa.gov

G. Dale Hess
Bureau of Meteorology Research Centre, Melbourne, VIC, Australia
dzh@bom.gov.au

Roy Maryon
Met Office, Bracknell, Reino Unido
rhmaryon@meto.gov.uk

Giovanni Graziani
JRC, Environment Institute, Ispra, Italia
giovanni.graziani@jrc.it

Werner Klug
Darmstadt, Alemania
dg5q@hrzpub.tu-darmstadt.de

Frank Gifford
Oak Ridge, TN, Estados Unidos