

# Fusión de datos de modelos numéricos y mediciones de campo de deposición atmosférica total a escala global: una iniciativa de la OMM

por Lorenzo Labrador<sup>1</sup>, Claudia Volosciuk<sup>1</sup> y Amanda Cole<sup>2</sup>

El principal mecanismo de limpieza de la atmósfera terrestre elimina los compuestos químicos del aire depositándolos sobre la superficie de la tierra y el agua. Si bien los efectos de estos procesos de eliminación son principalmente beneficiosos, algunos pueden tener impactos negativos en la salud humana, los ecosistemas y la seguridad alimentaria. Por ejemplo, la lluvia ácida –la acidificación del agua de lluvia debido a las emisiones de nitrógeno y azufre– daña los bosques, mata a los insectos, corroe las estructuras metálicas industriales, etc. Estos impactos adversos de la deposición son de gran interés para la sociedad en su conjunto y más particularmente para las instancias normativas y, por consiguiente, la OMM decidió emprender la iniciativa de Fusión de datos de modelos numéricos y mediciones de campo de deposición atmosférica total a escala global.

Con los cambios en las emisiones de contaminantes atmosféricos, la deposición atmosférica ha variado drásticamente en las últimas décadas. Sin una comprensión y evaluación adecuadas de la cantidad de contaminantes atmosféricos depositada en las superficies terrestres y acuáticas, la deposición atmosférica podría tener efectos desconocidos aún más perjudiciales para el bienestar de la sociedad, los ecosistemas y el funcionamiento del sistema atmósfera-tierra-océano. En vista de ello, muchas partes interesadas de la ciencia, los ecosistemas, la salud humana y la seguridad alimentaria –a escala mundial y nacional– tienen un gran interés en comprender en mayor medida la deposición atmosférica en todas

las escalas espaciales a fin de evaluar mejor sus efectos nocivos y diseñar las necesarias medidas de mitigación. La iniciativa de Fusión de mediciones y modelización propuesta por la Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG) de la OMM superará las limitaciones y maximizará el beneficio de las aproximaciones o enfoques existentes sobre la representación cartográfica de la deposición a escala mundial.

## Deposición atmosférica

La atmósfera de la Tierra, compuesta principalmente de nitrógeno y oxígeno, es un medio complejo. Además de estos dos componentes principales, contiene en su seno una amplia gama adicional de gases y partículas traza, algunos emitidos desde fuentes naturales, otros por las actividades humanas y otros creados por procesos químicos dentro de la atmósfera. Muchas de estas especies traza se consideran “contaminantes” debido a sus impactos negativos en la salud humana o en el medio ambiente natural o antropogénico. Los contaminantes se eliminan de la atmósfera y se depositan en las superficies terrestres y acuáticas de la Tierra a través de un proceso conocido como deposición atmosférica. Los contaminantes atmosféricos pueden eliminarse por deposición húmeda –precipitación– o por deposición seca. Esta última puede incluir sedimentación gravitacional de partículas, o difusión y transferencia turbulenta a la superficie y posterior absorción por las plantas o adsorción por superficies.

La deposición atmosférica es el principal proceso de eliminación para la mayoría de los compuestos químicos reactivos en la atmósfera. En muchas regiones,

1 Secretaría de la OMM

2 Ministerio de Medio Ambiente y Cambio Climático del Canadá

constituye el mecanismo principal para que los contaminantes se incorporen a un ecosistema, lo que representa un proceso clave en el sistema Tierra.

Las tasas a las que se depositan los contaminantes atmosféricos sobre las superficies terrestres y acuáticas de la Tierra vienen determinadas por factores meteorológicos como la temperatura, la precipitación, la humedad y el viento, así como por las propiedades (tanto físicas como químicas) de los gases o partículas depositados y las características de las superficies sobre las que estos compuestos se depositan. La combinación de todos estos factores determina cuánto tiempo permanecerá en la atmósfera un determinado contaminante atmosférico, cuán lejos de su fuente será transportado por el viento y en qué medida será eliminado de la atmósfera.

## Pertinencia para los Objetivos de Desarrollo Sostenible

La deposición atmosférica está vinculada, a través de varios impactos sobre el sistema Tierra, con determinados Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. La deposición de ciertos contaminantes atmosféricos, como el nitrógeno reactivo, el azufre, el ozono, el mercurio y el carbono negro, tiene el potencial de afectar la salud humana y causar graves daños a los ecosistemas y la vegetación, lo que influye

negativamente en la productividad agrícola y agrava los efectos del cambio climático.

La deposición de ozono sobre la vegetación, por ejemplo, afecta gravemente la provisión sostenible de alimentos, piensos y fibras en todo el mundo (ODS 2, Hambre cero). Además de su contribución directa al forzamiento radiativo, el ozono también puede afectar indirectamente a dicho forzamiento a través del daño a la vegetación, lo cual reduce la productividad de la planta, y a su vez lleva a una menor absorción de dióxido de carbono, resultando finalmente más dióxido de carbono en la atmósfera (ODS 13, Acción por el clima) (IPCC, 2013; OMM, 2018). Se ha estimado que el daño al ozono causa pérdidas económicas mundiales de entre diez y veinte mil millones de dólares de los Estados Unidos de América debido a sus efectos nocivos en cultivos alimentarios básicos como el trigo, la soja y el maíz (Avnery y otros, 2011). La pérdida de rendimiento anual estimado debido al ozono (caídas en el rendimiento del ozono, promedio de 2010 a 2012) es del 12,4 %, 7,1 %, 4,4 % y 6,1 % para la soja, el trigo, el arroz y el maíz, respectivamente, sumando hasta 227 Tg de pérdidas en rendimiento (Mills y otros, 2018). En la figura 1 se muestra un ejemplo del daño inducido por el ozono en las plantas y cómo ha ido empeorando con el tiempo. Las hojas más viejas de una planta mostrarán más daño que las más jóvenes, ya que las primeras estuvieron expuestas al ozono durante un período más largo.



Figura 1. Los daños causados por el ozono en hojas de judías (Black Turtle) aumentan cuando la exposición se prolonga: inicialmente, los daños son leves (izquierda) y después van agravándose (centro y derecha).



Figura 2. Imágenes del curso de capacitación organizado en el Centro de Enseñanza y de Formación Profesional de la VAG de la OMM (GAWTEC) sobre deposición atmosférica total en la estación de la VAG de Hohenpeißenberg. Recolectores de precipitación (izquierda) y diferentes muestras de deposición atmosférica recogida en filtros (derecha).

Del mismo modo, la deposición atmosférica de nitrógeno reactivo tiene un efecto directo sobre la salud del ecosistema, la producción agrícola en tierras gestionadas y no gestionadas, y el cambio climático. Se ha demostrado que los altos niveles de deposición de nitrógeno dan lugar a acidificación del suelo y del agua superficial, degradación de la calidad del agua y eutrofización, y afectan al crecimiento de la vegetación y a la diversidad de especies de plantas y animales. La deposición acumulada de nitrógeno puede conducir a la saturación del mismo de los suelos, lo que a su vez puede dar lugar a la pérdida de biodiversidad, la acidificación del suelo, la degradación del agua y la reducción del crecimiento forestal. Por lo tanto, la comprensión y el conocimiento de la deposición atmosférica a escala global son extremadamente importantes, en particular porque la deposición atmosférica está vinculada a 7 de los 17 Objetivos para el Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas.

### Mediciones de deposición atmosférica y técnica de fusión de datos de modelos numéricos y mediciones de campo

La deposición húmeda de contaminantes atmosféricos se mide recogiendo muestras de precipitación y midiendo concentraciones de los contaminantes buscados y el valor de la misma (figura 2). La deposición seca se estima comúnmente cuantificando las concentraciones de gases y partículas cerca de la superficie terrestre y utilizando modelos de cálculo para estimar sus velocidades de deposición en seco asociadas, es decir, la velocidad a la que estos contaminantes se depositan en la superficie de la Tierra. Ambos métodos requieren costosas y sofisticadas

redes de medición que se extienden sobre grandes áreas, como las coordinadas por la VAG. La deposición húmeda y seca también se estima mediante modelos de transporte químico, que combinan inventarios de emisiones con modelos meteorológicos y de procesos atmosféricos a escala regional y/o global. Tanto el enfoque de medición como el de modelización tienen ventajas y desventajas específicas, pero ninguno es perfecto.

Los mapas actuales de deposición atmosférica a escala global se basan en un conjunto limitado de mediciones o en las predicciones de los modelos de transporte químico. Ambos tipos de mapas contienen grandes incertidumbres: las mediciones de deposición son escasas o inexistentes en grandes áreas del mundo, es decir, África, Asia, Australia y América del Sur así como sobre los océanos y, por su parte, los modelos de transporte químico dependen necesariamente de suposiciones y simplificaciones tanto en sus balances de emisiones como en las parametrizaciones.

Para superar las limitaciones y maximizar el beneficio de ambos enfoques, se ha desarrollado un nuevo método para crear mapas de deposición, denominado Fusión de datos de modelos numéricos y mediciones de campo (conocido como MMF, por sus siglas en inglés). Dicho método combina las mejores mediciones disponibles de deposición húmeda y seca, incluidas las concentraciones atmosféricas, con las mejores estimaciones de deposición disponibles de los modelos de transporte químico, utilizando métodos estadísticos. La técnica "aproxima" o ajusta las estimaciones del modelo más cerca de los valores reales al incorporar o "asimilar" valores de medición, de la misma manera que las observaciones de variables meteorológicas, como la temperatura, la

Figura 3 (a)

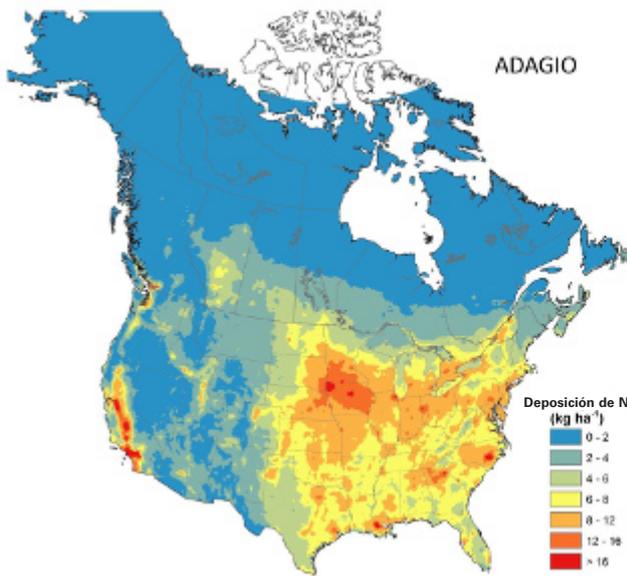


Figura 3 (b)

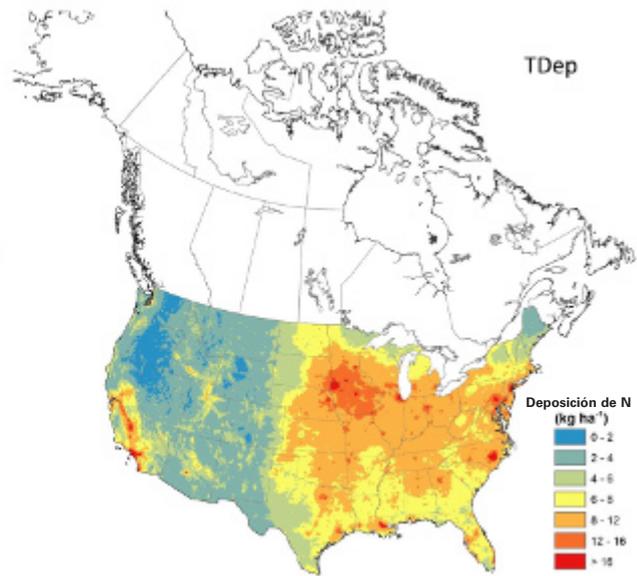


Figura 3. Mapas actuales de fusión de datos de modelos numéricos y mediciones de campo de la deposición atmosférica total. a) Mapa de deposición total de nitrógeno en 2010, en  $\text{kg N ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ , producido por el Ministerio de Medio Ambiente y Cambio Climático del Canadá (Schwede y otros, 2019); b) mapa de deposición total de nitrógeno en 2010 en  $\text{kg N ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ , producido por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos (Schwede y otros, 2019).

**Deposición total de SOx  
( $\text{mg S/m}^2$ ) en 2017**

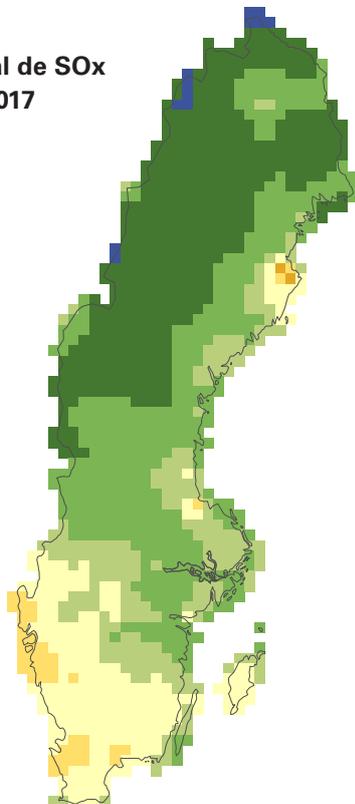


Figura 4. Mapa de deposición de azufre en 2017 en Suecia, en  $\text{mg S m}^{-2} \text{año}^{-1}$ , producido por el Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia (Leung y otros, 2019).

velocidad del viento, la dirección del viento y la humedad relativa se asimilan en los modelos de predicción numérica del tiempo (PNT) para mejorar la precisión de los pronósticos meteorológicos. Sin embargo, a diferencia de la PNT, las mediciones de deposición atmosférica no pueden incorporarse a los modelos de deposición en tiempo real o casi real, ya que las mediciones relacionadas con la deposición deben procesarse y analizarse después de ser tomadas. En cambio, las observaciones se asimilan en una etapa posterior o retroactivamente.

*El resultado de este proceso son mapas de deposición atmosférica que proporcionan estimaciones más precisas de la deposición húmeda y seca que las que podrían lograrse solo con la observación o únicamente con las estimaciones del modelo.*

Los métodos MMF se han desarrollado y aplicado con éxito en varios países, incluidos el Canadá, Suecia y los Estados Unidos, pero aún no se han aplicado a escala mundial. Las figuras 3 (a y b) y la figura 4 muestran

ejemplos de mapas de deposición MMF de alta resolución producidos por el Canadá, los Estados Unidos y Suecia, respectivamente. Estos métodos proporcionan la base científica y metodológica para expandir los mapas de deposición de las escalas nacional y regional a la escala global.

## Iniciativa de la OMM sobre Fusión de datos de modelos numéricos y mediciones de campo de deposición atmosférica total a escala global

La VAG ahora está en condiciones de involucrar y coordinar a expertos líderes en deposición atmosférica y MMF de todo el mundo para desarrollar y aplicar técnicas MMF en la producción de mapas de deposición global. Se basarán en avances recientes en la modelización del transporte químico y en el uso de observaciones satelitales de la deposición atmosférica, así como en la red de superficie para la medición de concentraciones y flujos de deposición coordinados por el Grupo consultivo científico de la OMM sobre la deposición atmosférica total.

El objetivo de la Iniciativa es utilizar una combinación de modelos y observaciones de deposición atmosférica regional y global para producir mapas de alta calidad de deposición atmosférica total –húmeda más seca– y estimaciones de flujos de contaminantes atmosféricos a escala global de una manera semioperativa. Esta iniciativa, aún en sus primeras etapas, se conoce como Fusión de datos de modelos numéricos y mediciones de campo de deposición atmosférica total a escala global. Vale la pena señalar que los mapas MMF actuales de deposición atmosférica son el resultado de los esfuerzos realizados por países individuales o dos países trabajando conjuntamente y son de alcance nacional o regional.

Actualmente, muchos países carecen de la capacidad y el conocimiento para poder dar cuenta de la deposición atmosférica en sus decisiones científicas, de formulación de políticas y de planificación relacionadas con los ODS de las Naciones Unidas. Los mapas MMF de deposición a escala global, formulados a partir de las mejores estimaciones de mediciones y modelos, servirán para informar y respaldar estos procesos de toma de decisiones.

Los mapas globales de alta calidad sobre deposición y concentración, y sus archivos de datos asociados, permitirán a los organismos gubernamentales y otras partes

interesadas evaluar los impactos de la deposición atmosférica de componentes químicos en la salud de la población, los ecosistemas terrestres y oceánicos, las superficies dedicadas a la agricultura y el cambio climático. Sus decisiones y acciones deberían basarse en los mejores datos científicos disponibles. La VAG ya juega un papel central en la recopilación de datos y el control de calidad de las mediciones de deposición en la superficie. En el marco de la Iniciativa, también desempeñará un papel clave en el avance de la producción operativa de mapas MMF de deposición atmosférica a escala global (y, adicionalmente, a escala regional en áreas del mundo con escasa cobertura de medición) así como en proporcionar resultados autorizados y conocimiento para las Naciones Unidas y sus Estados Miembros. Esto se refleja en la siguiente Declaración de Visión para la Iniciativa:

*Las partes interesadas podrán acceder a mapas a escala global, de alta resolución y de alta calidad, de deposición atmosférica total para satisfacer las necesidades de la sociedad en relación con el medioambiente y el desarrollo sostenible global.*

## Implementación de la Iniciativa

El Plan de ejecución de la VAG de la OMM para 2016-2023 se basa en el concepto de “Ciencia para los servicios”. En este contexto, la iniciativa de Fusión de datos de modelos numéricos y mediciones de campo de deposición atmosférica total a escala global es uno de los nuevos servicios de la VAG identificados por el Congreso Meteorológico Mundial de junio de 2019, en la Resolución 60 que aborda las necesidades de los usuarios. Con arreglo a esta visión, los objetivos de la citada Iniciativa son los siguientes:

- Crear y difundir mapas MMF globales de alta calidad y productos de datos de deposición atmosférica de alta resolución espacial sobre una base semioperativa (incluidos los conjuntos de datos de mediciones de calidad contrastada asociados y las salidas del modelo de transporte químico).
- Proporcionar mejoras continuas a los productos operativos a través de innovaciones de investigación en el seguimiento de la deposición, modelización del transporte químico, técnicas de asimilación y fusión de datos y otros sistemas de observación (por ejemplo, mediciones satelitales).

- Involucrar continuamente a los usuarios de datos, partes interesadas y asociados para satisfacer sus necesidades y prioridades en constante evolución.
- Proporcionar procedimientos personalizados, asesoramiento técnico y productos a la medida para satisfacer las necesidades específicas de los usuarios y las partes interesadas (por ejemplo, deposiciones específicas en ecosistemas, indicadores derivados, tendencias de deposiciones a largo plazo).
- Desarrollar capacidad (técnica/institucional/personal) y comunicarse con las comunidades y organizaciones científicas/políticas relevantes para las cuales la información sobre la deposición atmosférica es desconocida, infrautilizada o limitada.
- Trabajar con los programas de mediciones existentes, regionales y nacionales, de la OMM y asociados de las Naciones Unidas (p. ej., redes, satélites) para alentar la expansión y la mejora de las observaciones de deposición en áreas poco muestreadas.
- Realzar y mejorar las predicciones de deposición, calidad del aire y clima al proporcionar orientación sobre la incorporación de la deposición atmosférica en el enfoque de modelización del sistema Tierra para el suelo, el hielo, los océanos y la atmósfera.
- Posibilitar y colaborar con usuarios y partes interesadas para aplicar el conocimiento actual y futuro de la deposición global de la Iniciativa para evaluar el impacto de las variaciones de deposición en los cambios en el clima, los ecosistemas, las emisiones y la sociedad mundial a través de su relación con los correspondientes ODS de las Naciones Unidas.
- Establecer un Plan de ejecución formal para organizar y ejecutar la Iniciativa siguiendo sus objetivos establecidos a corto y medio plazo.

La Iniciativa pondrá en marcha un sistema operativo integral que incorpore el encuentro entre la recogida de datos de medición y las salidas de la modelización, la aplicación de técnicas MMF y el desarrollo y el suministro de productos y servicios. La Iniciativa requerirá un enfoque altamente integrado y coordinado de las actividades que abarcan varios campos diferentes de la ciencia atmosférica. La lista incluye la composición atmosférica y las mediciones de deposición (tales como estaciones de la VAG, redes de medición regionales y

nacionales), modelización del transporte químico (escalas regionales, nacionales y globales), inventarios de emisiones, asimilación de datos/fusión de mediciones y modelos, gestión de bases de datos y difusión y suministro de productos.

Para cumplir con los objetivos de la Iniciativa, todos los servicios y productos proporcionados por la misma vendrán determinados por las necesidades del usuario. Esto se logrará mediante consultas e información de retorno en reuniones y talleres destinados a definir sus necesidades específicas.

La Iniciativa fue lanzada en febrero de 2019, en la sede de la OMM en Ginebra, por una reunión de expertos con miembros del campo de las observaciones y la modelización de la deposición atmosférica, los aerosoles y gases reactivos, las técnicas MMF para la seguridad alimentaria y los ecosistemas. El encuentro definió los aspectos técnicos y financieros relacionados con la implementación de la Iniciativa y se comenzó a trabajar en dicho plan de puesta en marcha.

Muchos de los elementos técnicos y científicos están ya actualmente disponibles. La Iniciativa ahora está recabando fondos para avanzar en la producción de mapas de depósito globales. La VAG agradece las contribuciones en especie y financieras de los Miembros y asociados de la OMM a la Iniciativa. Varias organizaciones científicas, sociales y relacionadas con la política esperan la producción rutinaria de los mapas globales de deposición atmosférica bajo esta iniciativa.

Agradecimientos: Este artículo se ha basado en el documento de nota conceptual de la Iniciativa, redactado por Wenche Aas, Camilla Andersson, Amanda Cole, Frank Dentener, Joshua Fu, Corinne Galy-Lacaux, Maria Kanakidou, Lorenzo Labrador, Kobus Pienaar, Donna Schwede y Robert Vet.

## Referencias

- Avnery, S., Mauzerall, D. L., Liu, J. y Horowitz, L. W., 2011. Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 1. Year 2000 crop production losses and economic damage. *Atmospheric Environment*, 45:13, pp. 2284-2296.
- Leung, W., Alpfjord Wylde, H. y Andersson, C., 2019. National environmental assessment with the MATCH

Sweden system, evaluation of results for the years 2015-2017 (en sueco). Swedish Meteorological and Hydrological Institute. [https://www.smhi.se/polopoly\\_fs/1.146627!/Slutrapport2015-17\\_M%C3%96.pdf](https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.146627!/Slutrapport2015-17_M%C3%96.pdf).

Mills, G., Sharps, K., Simpson, D., Pleijel, H., Broberg, M., Uddling, J., Jaramillo, F., Davies, D., Dentener, F., Van den Berg, M., Agrawal, M., Agrawal, S. B., Ainsworth, E. A., Büker, P., Emberson, L., Feng, Z., Harmens, H., Hayes, F., Kobayashi, K., Paoletti, E. y Van Dingenen, R., 2018. Ozone pollution will compromise efforts to increase global wheat production. *Global Change Biology*, 24: 8, pp. 3560-3574. [doi.org/10.1111/gcb.14157](https://doi.org/10.1111/gcb.14157).

Schwede, D., Cole, A., Vet, R. y Lear, G., 2019. On-going U.S.-Canada collaboration on nitrogen and sulfur deposition. *EM: The Magazine for Environmental Managers*, junio de 2019.

IPCC, 2013. Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge (Reino Unido) y Nueva York, Cambridge University Press.

OMM, 2018. Boletín de la OMM sobre los gases reactivos. N° 2: Aspectos más destacados del Programa de Vigilancia de la Atmósfera Global. Ginebra.