

CO, CO₂, N₂O y H₂O) medidos con el sistema FTS en el OAI.

Para emplear estas series temporales de observaciones en la investigación atmosférica es necesario asegurar la calidad y consistencia de las mismas. En este sentido, ha habido un gran esfuerzo para garantizar y mejorar la alta calidad de los productos FTS, desde mejoras técnicas como la implementación de precisos seguidores solares hasta el desarrollo de sofisticados algoritmos de inversión. La buena calidad de estos productos es continuamente documentada mediante estudios de validación teóricos y experimentales, los cuales muestran, por ejemplo, que el FTS es capaz de derivar la concentración total en columna del ozono o del vapor de agua con una precisión de 0.5 - 1%. Esta alta calidad hace que los productos FTS hayan sido ampliamente utilizados para la validación de medidas de sensores remotos de satélite (ILAS, ACE-FTS, IASI, etc.) y de las simulaciones de modelos atmosféricos, así como para investigar aspectos fundamentales del cambio climático. Un ejemplo es el ciclo del agua atmosférico, como se detalla en el siguiente artículo "Investigación del ciclo atmosférico del agua mediante isótopos: el papel del proyecto MUSICA".

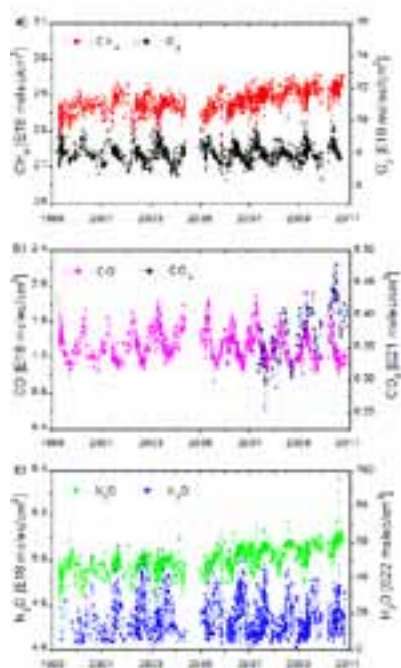


Figura 3. Serie temporal de la columna total de CH₄ y O₃ (a), CO y CO₂ (b), N₂O y H₂O (c) medido por el sistema FTS en el OAI.

Investigación del ciclo atmosférico del agua mediante isótopos

EL PAPEL DEL PROYECTO MUSICA

OMAIRA GARCÍA¹ Y MATTHIAS SCHNEIDER²

¹CENTRO DE INVESTIGACIÓN ATMOSFÉRICA DE IZAÑA, AEMET, TENERIFE.

²INSTITUTE FOR METEOROLOGY AND CLIMATE RESEARCH (IMK-ASF), KARLSRUHE INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ALEMANIA.

El agua, en sus diversas formas, tiene un papel fundamental en casi todos los aspectos del clima de nuestro planeta. Por tanto, mejorar el conocimiento y la caracterización del ciclo del agua es fundamental para entender el sistema climático y predecir sus posibles cambios. En este contexto, los isótopos del vapor de agua ofrecen posibilidades prometedoras para investigar las fuentes, depósitos, y procesos de transporte de la humedad atmosférica. El proyecto MUSICA (*M*ulti-*p*latform remote *S*ensing of *I*sotopologues for investigating the *C*ycle of *A*tmospheric *w*ater) tiene un papel muy importante en esta innovadora línea de investigación.

El ciclo atmosférico del agua y los isótopos del vapor de agua

El subsistema climático Tierra-Atmósfera está íntimamente conectado al ciclo del agua (Fig. 1). Por ello, la comprensión del ciclo completo de la evaporación, los procesos de transporte de la humedad, la formación de nubes y la precipitación es una de las principales prioridades científicas en las proyecciones a medio y largo plazo del cambio climático, así como en la reducción de sus incertidumbres. De hecho, es uno de los objetivos prioritarios del quinto informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) para 2013.

Investigación del ciclo atmosférico del agua mediante isótopos:

EL PAPEL DEL PROYECTO MUSICA



Figura 1. Diagrama del ciclo del agua tomado del Servicio Geológico de EE. UU. (U.S. Geological Survey, USGS, <http://www.usgs.gov/>)

A pesar de su importancia, hay muchos aspectos del ciclo del agua que aún no entendemos de forma adecuada. Por ejemplo: ¿Qué procesos determinan la humedad en la troposfera alta, donde el agua es un potente gas de efecto invernadero? ¿Cuál es la importancia real de la evapotranspiración desde la biosfera, la evaporación desde la superficie terrestre o desde las gotas de lluvia en el balance energético e hidrológico? ¿Cómo afectará el progresivo deshielo de las regiones polares en la distribución de la humedad en la atmósfera a escala global? ¿Ya se pueden identificar cambios en el ciclo del agua atmosférico debido al calentamiento global?

Disponer de observaciones de alta calidad del estado actual de la atmósfera es una premisa esencial para avanzar en este campo científico. Estos datos describen las condiciones reales y son la referencia para el desarrollo y mejora de los modelos climáticos globales. La calidad de las proyecciones de cambio climático de estos modelos depende directamente de la calidad y diversidad de los datos de observación. En este contexto, las medidas de las relaciones entre isótopos del vapor de agua (p.e., $\text{HD}^{16}\text{O}/\text{H}_2^{16}\text{O}$) son muy prometedoras, ya que ofrecen mayores posibilidades para investigar el ciclo del agua atmosférica que las observaciones de vapor de agua por sí solas [Worden y col., 2007; Risi y col., 2012]. En adelante se expresará, por simplicidad, HD^{16}O y H_2^{16}O como HDO y H_2O respectivamente, mientras que la relación entre ellos, $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$, como,

$$\delta D = 1000\% \times \left(\frac{[\text{HDO}]/[\text{H}_2\text{O}]}{\text{SMOW}} - 1 \right)$$

donde $\text{SMOW} = 3.1152 \times 10^{-4}$ (SMOW: *Standard Mean Ocean Water*, Craig, 1961).

La relación entre isótopos, como el δD , se ve afectada por la evaporación, condensación y procesos de las nubes. El valor de δD varía, por ejemplo, si la evaporación se produce en aguas oceánicas frías o calientes (y bajo condiciones ambientales secas o húmedas), a partir de gotas de lluvia, de plantas, o en la superficie de la Tierra. Otro ejemplo son los procesos de transporte de las masas de aire en la atmósfera. Por ejemplo, el δD del vapor de agua cambia continuamente cuando la masa de aire húmedo se desplaza lentamente a zonas más frías (más altas) de la atmósfera. En esos casos, la concentración de isótopos pesados (p.e., HDO) se reduce gradualmente y, en general, esta reducción es más pronunciada a medida que la temperatura disminuye. Por el contrario, si el proceso de transporte es rápido, p.e. en zonas

de mucha convección, el δD prácticamente no se modifica. Así, el δD contiene información adicional de la historia de la masa de agua, y permite una mejor identificación de los diferentes aspectos del ciclo del agua atmosférica.

Incorporar los isótopos del vapor de agua en los modelos globales de circulación atmosférica y comparar las simulaciones con observaciones reales es un método muy prometedor para investigar los diferentes vínculos del ciclo atmosférico del agua con el clima, así como para documentar la capacidad real de estos modelos climáticos de simularlo correctamente. Hasta ahora, este campo de investigación no ha sido explorado en profundidad debido a la falta de observaciones consistentes de isótopos, de alta calidad, a largo plazo y con amplia cobertura geográfica.

Historia de las medidas de isótopos del vapor de agua

Comparado con la gran variabilidad de las concentraciones del vapor de agua atmosférico las relaciones isotópicas son relativamente estables. Eso convierte la medida de las relaciones isotópicas en una tarea muy compleja: se requieren técnicas que sean sensibles en un rango dinámico muy amplio y, al mismo tiempo, muy precisas para captar las pequeñas señales de los isótopos. En el pasado, estas exigencias de precisión solo se alcanzaban con las técnicas *in situ*. Así, la observación sistemática de isótopos estables troposféricos del agua con técnicas *in situ* comenzó en 1961 en el marco de la red global GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation, http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnip.html), mientras que no es hasta una década después cuando Ehhalt [1974] realizó las primeras observa-

ciones *in situ* de perfiles verticales de δD del vapor de agua en varias campañas de avión. No obstante, debido a la falta de técnicas de operación sencilla, estas observaciones se habían limitado a campañas de medida esporádicas [p.e., Zahn, 2001; Webster y Heymsfield, 2003].

Recientemente, el desarrollo de instrumentación más precisa y sofisticados algoritmos matemáticos ha permitido realizar una monitorización continua de estos gases, empleando tanto técnicas *in situ* como remotas (terrestres y espaciales). De especial interés es el uso de estas últimas, ya que permiten una observación integral de la atmósfera. Así, Schneider y col. [2006, 2010], documentaron la posibilidad de la red terrestre de sistemas FTS (*Fourier Transform Spectrometer*) para obtener perfiles verticales de H_2O y δD . Por otra parte, Worden y col. [2006] y Frankenberg y col. [2009] han proporcionado las primeras medidas de δD troposférico, obtenidos desde los sensores espaciales TES (*Tropospheric Emission Spectrometer*) y SCIAMACHY (*Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography*) respectivamente. Asimismo, en 2011 Schneider y Hase [2011] presentaron las primeras observaciones de H_2O y δD desde un satélite meteorológico operativo, empleando el sensor IASI (*Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*) a bordo del MetOp de EUMETSAT (*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*). Estos recientes desarrollos son un gran avance hacia una observación continua y global de los isótopos de agua atmosféricos.

Proyecto MUSICA

Para cubrir la carencia de medidas de alta calidad de perfiles troposféricos de H_2O y δD , con una metodología homogénea, surge el proyecto europeo MUSICA (*MUlti-platform remote Sensing of Isotopologues for investigating the Cycle of Atmospheric water*, <http://www.imk-asf.kit.edu/musica>), del *European Research Council*. Este proyecto combina, por primera vez y de una manera consistente, observaciones *in situ* con datos de teledetección terrestre y espacial. Así, MUSICA se basa fundamentalmente en estas tres componentes de observación:

❶ **Componente Terrestre:** Consiste en crear una red global de medidas de vapor de agua e isótopos, empleando una red terrestre de sistemas FTS, los cuales ofrecen largas series temporales con una alta calidad. Esta red, en el marco de NDACC (*Network for the Detection of Atmospheric Composition Change*, <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/>), cuenta con diez estaciones terrestres (Fig. 2), cubriendo diversas regio-

nes geográficas: latitudes polares, medias, tropicales y subtropicales. El Observatorio Atmosférico de Izaña (OAI) del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (CIAI-Agencia Estatal de Meteorología, AEMET) será la estación de referencia de esta red global. Dada su ubicación geográfica y su gran variedad de medidas atmosféricas científicas, el OAI es un emplazamiento perfecto para desarrollar y validar medidas de teledetección. Más detalles sobre la técnica FTS se proporcionan en el anterior artículo de este boletín “Monitorización de Gases Atmosféricos mediante Espectrometría de Infrarrojo por Transformada de Fourier”.



Figura 2. Distribución geográfica de las diez estaciones FTS empleadas en el proyecto MUSICA. Entre paréntesis se indica la fecha de comienzo de las medidas en cada estación.

❷ **Componente Espacial:** La información espacial se obtiene de un sensor remoto de última generación, el IASI, a bordo del satélite meteorológico operativo MetOp/EUMETSAT, garantizando así una amplia cobertura geográfica. Entre los sensores remotos actuales, el IASI tiene una posición relevante, ya que combina perfectamente los requisitos necesarios para la predicción meteorológica (alta cobertura espacial y buena resolución temporal) y para la investigación atmosférica (alta resolución espectral que permite la medida de concentraciones de gases atmosféricos). Este instrumento, basado también en un espectrómetro de infrarrojo por transformada de Fourier, registra los espectros de emisión en la región del infrarrojo térmico del sistema Tierra-atmósfera. Para ello, combina una excelente resolución horizontal (tamaño de píxel en el nadir de 12 km), una relación señal-ruido muy buena, con una alta resolución espectral (0.5 cm^{-1} entre 645 y 2760 cm^{-1}) y una cobertura global dos veces al día. El IASI proporciona datos operacionales desde el año 2007 y su misión está garantizada hasta el 2020 a bordo de la serie de tres satélites MetOp. Todas estas ca-

Investigación del ciclo atmosférico del agua mediante isótopos:

EL PAPEL DEL PROYECTO MUSICA

racterísticas hacen de este instrumento un elemento clave en la investigación atmosférica. En las Figs. 3 y 4 se muestran, a modo de ejemplo, la distribución espacial del H₂O y δD a 5 km de altitud sobre la región de Canarias para condiciones de medida típicas en la región.

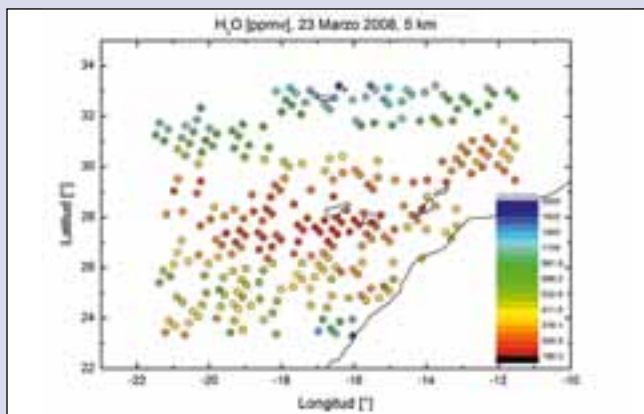


Figura 3. Medida del H₂O [ppmv] a 5 km obtenida del sensor remoto IASI para el 23 de Marzo de 2008 sobre la región de Canarias.

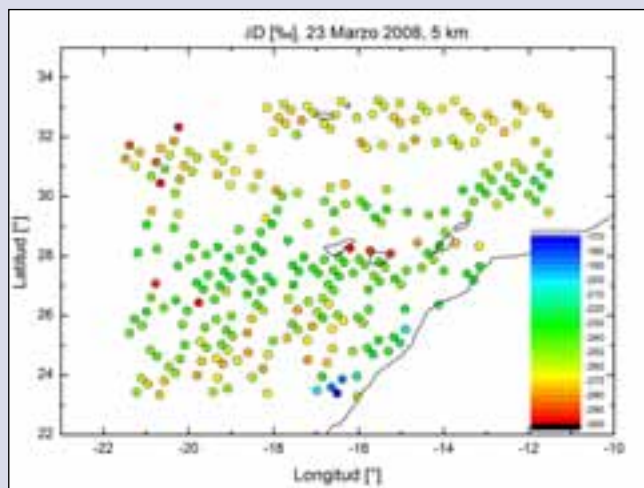


Figura 4. Medida del δD [‰] a 3 km obtenida del sensor remoto IASI para el 23 de marzo de 2008 sobre la región de Canarias.

Las primeras series de datos de isótopos troposféricos de vapor de agua a partir de los espectros del sensor remoto IASI han sido obtenidas recientemente en el contexto del proyecto MUSICA [Schneider y Hase, 2011]. En este trabajo, las nuevas observaciones de H₂O y δD desde el IASI son validadas comparándolas con medidas coincidentes de radiosondeos meteorológicos y medidas remotas de FTS tomadas en el OAI. Así, la Fig. 5 muestra el área de validación empleada en el estudio al sur de Tenerife, en el Atlántico sub-

tropical, mientras que la Fig. 6 representa las correlaciones para el H₂O y δD en capas medias de la troposfera obtenidas desde el IASI y el FTS localizado en el OAI. Como se observa, las dos series son muy consistentes, no existiendo diferencias sistemáticas significativas entre los datos IASI y FTS. La dispersión entre los datos se explica por las diferencias en la sensibilidad entre un experimento de teledetección terrestre y otro de teledetección espacial. Estos resultados son

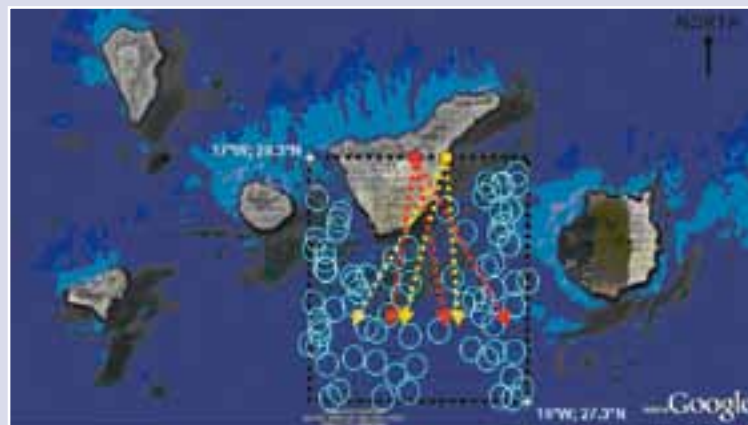


Figura 5. Área de validación al sur de Tenerife (Islas Canarias). Los círculos en cian representan los píxeles de medida individual del IASI usados en el estudio de Schneider y Hase [2011]. Las flechas rojas indican la masa óptica detectada por el sistema FTS, localizado en el OAI, mientras que las flechas amarillas la masa óptica típicamente detectada por los radiosondeos meteorológicos Vaisala RS92 lanzados en Tenerife durante los pases matutinos del IASI sobre el OAI.

muy prometedores y permitirían combinar ambas técnicas de medidas remotas. Tal combinación se beneficiaría de las observaciones históricas de los sistemas FTS en tierra, las cuales se remontan hasta los años noventa en aproximadamente 25 estaciones distribuidas globalmente, y de la amplia cobertura geográfica de las observaciones espaciales del sensor remoto IASI.

③ **Componente *in situ*:** Finalmente, las medidas remotas se complementan con las observaciones *in situ* de isótopos del vapor de agua a diferentes altitudes de la troposfera. Estas medidas permitirán, a su vez, documentar la calidad y consistencia de las medidas remotas de los instrumentos IASI y FTS. En esta parte del proyecto, el OAI juega un papel clave, ya que los datos en superficie de δD se complementarán con las medidas de los perfiles verticales de δD, que se tomarán durante dos campañas de aviación en el invierno de 2012 y el verano 2013.

El equipo científico de MUSICA lo forman investigadores del Instituto Tecnológico de Karlsruhe (KIT, Alemania) y del CIAI-AEMET (España), aunque involucra a numerosas instituciones de investigación internacionales de más de 10 paí-

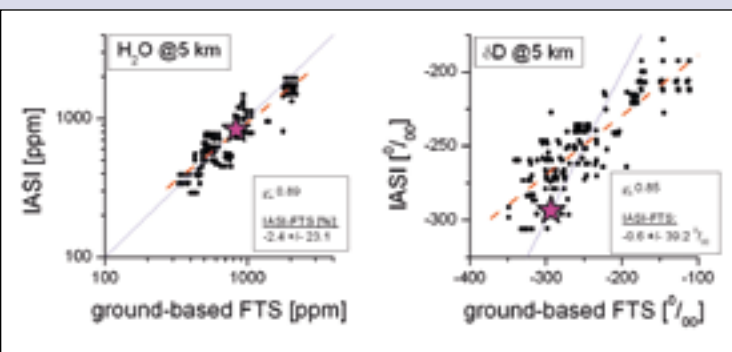


Figura 6. Correlación entre el H_2O [ppm] y δD [‰] en capas medias de la troposfera (5 km) obtenidos con el IASI y el FTS. En la leyenda aparece el coeficiente de correlación, ρ , del ajuste teórico por mínimos cuadrados (línea discontinua roja) y la diferencia promedio entre las medidas IASI y FTS. La estrella en magenta indica el valor a priori utilizado en la inversión y la línea continua azul la diagonal.

ses (Alemania, Bélgica, España, Francia, Suecia, Canadá, Estados Unidos, Etiopía, Japón, Australia y Nueva Zelanda). No obstante, el número de instituciones colaboradoras está continuamente aumentando y se espera que continúe durante toda la duración del proyecto (2011-2016).

Resumen

La composición isotópica del vapor de agua atmosférico permite realizar un estudio detallado de muchos procesos del ciclo del agua. No obstante, su medida es muy compleja. En este contexto, la combinación de medidas *in situ* y remotas (terrestres y espaciales) es una estrategia óptima, ya que permite obtener series de datos largas con una alta calidad y una cobertura global. En el marco del proyecto MUSICA se aplicará esta estrategia y se producirá un novedoso conjunto de datos de isótopos de vapor de agua atmosférico, cubriendo un periodo de hasta 20 años. Estas medidas facilitarán la revisión y actualización de modelos climáticos globales y su tratamiento del ciclo de agua, reduciendo así las incertidumbres en las predicciones climáticas. Para ello, los científicos de MUSICA colaborarán de forma explícita con expertos internacionales en modelos climáticos y con miembros científicos del IPCC.



AGRADECIMIENTOS: El proyecto MUSICA es financiado por el European Research Council (ERC) bajo el Séptimo Programa Marco (FP7/2007-2013)/ERC con número de referencia 256961.

Referencias

- Craig, H.: Standard for Reporting Concentrations of Deuterium and Oxygen-18 in Natural Waters, *Science*, 133, 1833-1834, 1961.
- Ehhalt, D. H.: Vertical profiles of HTO, HDO, and H₂O in the Troposphere, Rep. NCAR-TN/STR-100, Natl. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Colorado, EE.UU., 1974.
- Frankenberg, C., Yoshimura, K., Warneke, T., Aben, I., Butz, A., Deutscher, N., Griffith, D., Hase, F., Notholt, J., Schneider, M., Schreyver, H., y Röckmann, T.: Dynamic processes governing lower-tropospheric HDO/H₂O ratios as observed from space and ground, *Science*, 325, 1374-1377, 2009.
- Risi, C., Noone, D., Worden, J., Frankenberg, C., Stiller, G., Kiefer, M., Funke, B., Walker, K., Bernath, P., Schneider, M., Bony, S., Lee, J., Brown, D. y Sturm, C.: Process-evaluation of tropospheric humidity simulated by general circulation models using water vapor isotopic observations: 2. Using isotopic diagnostics to understand the mid and upper tropospheric moist bias in the tropics and subtropics, *J. Geophys. Res.*, 117, D05304, doi:10.1029/2011JD016623, 2012.
- Schneider, M., Hase, F., y Blumenstock, T.: Ground-based remote sensing of HDO/H₂O ratio profiles: introduction and validation of an innovative retrieval approach, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 4705-4722, doi:10.5194/acp-6-4705-2006, 2006.
- Schneider, M., Yoshimura, K., Hase, F., y Blumenstock, T.: The ground-based FTIR network's potential for investigating the atmospheric water cycle, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 3427-3442, 2010.
- Schneider, M. y Hase, F.: Optimal estimation of tropospheric H₂O and D with IASI/METOP, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 16107-16146, 2011.
- Webster, C. R. y Heymsfield, A. J.: Water isotope ratios D/H, 18O/16O, 17O/16O in and out of clouds map dehydration pathways, *Science*, 302, 1742-1745, 2003.
- Worden, J. R., Bowman, K., Noone, D., Beer, R., Clough, S., Eldering, A., Fisher, B., Goldman, A., Gunson, M., Herman, R., Kulawik, S. S., Lampel, M., Luo, M., Osterman, G., Rinsland, C., Rodgers, C., Sander, S., Shephard, M., y Worden, H.: TES observations of the tropospheric HDO/H₂O ratio: retrieval approach and characterization, *J. Geophys. Res.*, 111, D16309, 2006.
- Worden, J., Noone, D. y Bowman, K.: Importance of rain evaporation and continental convection in the tropical water cycle, *Nature* 445, 528-532, doi:10.1038/nature05508, 2007.
- Zahn, A.: Constraints on 2-Way Transport across the Arctic Tropopause Based on O₃, Stratospheric Tracer (SF₆) Ages, and Water Vapor Isotope (D, T) Tracers, *J. Atmos. Chem.* 39, 303- 325, 2001.