

Monitorización Global de los Gases de Efecto Invernadero Metano y Óxido Nitroso a partir del Metop/IASI

García, O.⁽¹⁾, Schneider, M.⁽²⁾, Ertl, B.⁽²⁾, Sepúlveda, E.⁽¹⁾, Borger, C.^(2,a), Diekmann, C.⁽²⁾, Wiegele, A.⁽²⁾, Hase, F.⁽²⁾, Barthlott, S.⁽²⁾, Blumenstock, T.⁽²⁾, Raffalski, U.⁽³⁾, Gómez-Peláez, A.^(1,b), Steinbacher, M.⁽⁴⁾, Ries, L.⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (CIAI), Agencia Estatal de Meteorología (AEMET),

Santa Cruz de Tenerife, España. ogarcia@aemet.es

⁽²⁾ Instituto de Tecnología de Karlsruhe, Karlsruhe, Alemania.

⁽³⁾ Instituto Sueco para la Física del Espacio, Kiruna, Suecia.

⁽⁴⁾ Laboratorios Federal Suizo para la Tecnología y la Ciencia de los Materiales (Empa), Dübendorf, Suiza.

⁽⁵⁾ Plataforma Zugspitze del Observatorio Global GAW de Zugspitze/Hohenpeissenberg, Agencia Federal del Medio Ambiente, Federal Environmental Agency (UBA), Zugspitze, Alemania.

^(a) Ahora en el Grupo de Teledetección Satelital, Instituto Max Planck de Química, Mainz, Alemania.

^(b) Ahora en el Centro Meteorológico de Asturias, Agencia Estatal de Meteorología, Oviedo, España.

Resumen: El futuro del sistema Tierra-atmósfera dependerá, en gran medida, de nuestra capacidad para entender todos los procesos que están conduciendo al cambio climático y, en este contexto, los gases de efecto invernadero (GEIs) juegan un papel clave como uno de los principales motores del cambio climático. Con esta idea nace el proyecto INMENSE (*IASI for Surveying Methane and Nitrous Oxide in the Troposphere*), el cual tiene como objetivo mejorar nuestra comprensión de los balances atmosféricos de dos de los más importantes GHGs, el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). Conocer las distribuciones atmosféricas de CH₄ y N₂O, tanto a escala local como global así como su variabilidad temporal, es esencial para identificar y cuantificar sus fuentes y sumideros, para predecir su evolución en la atmósfera y su papel en el cambio climático. Para ello, el proyecto INMENSE generará nuevas observaciones de concentraciones de CH₄ y N₂O en la troposfera media/alta a escala global a partir de las medidas satelitales del sensor IASI (*Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*), que vuela a bordo de los satélites meteorológicos EUMETSAT/Metop. En este trabajo los productos INMENSE CH₄ y N₂O son presentados, caracterizados y extensamente validados usando una base de datos de referencia multi-plataforma. Esta completa validación nos permite documentar la calidad y consistencia temporal de los nuevos productos IASI de CH₄ y N₂O, así como su uniformidad geográfica. Por último, mediante la comparativa con simulaciones de modelos químicos de transporte, se analizará el tipo señales de fuentes y sumideros de CH₄ y N₂O que pueden ser capturadas por las observaciones IASI.

Palabras clave: gases de efecto invernadero, metano, óxido nitroso, IASI, INMENSE.

Global Monitoring of Methane and Nitrous Oxide Greenhouse Gases from Metop/IASI

Abstract: Future of the Earth-atmosphere system will depend, to a large extent, on our capability of understanding all the processes driving climate change and, in this context, of outstanding importance are the monitoring and the investigation of greenhouse gases (GHGs), as main drivers of the Earth's climate change. With this idea the project INMENSE (*IASI for Surveying Methane and Nitrous Oxide in the Troposphere*) was born, which aims to improve our current understanding of the atmospheric budgets of two of the most important well-mixed greenhouse gases, methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O). Knowledge of the atmospheric distributions of CH₄ and N₂O, from the local to global scales, as well as their variability in time is essential for a better understanding of their sinks and sources, for predicting their evolution in the atmosphere, and their role in climate change. To do so, INMENSE will generate a new global observational data set of middle/upper tropospheric concentrations of CH₄ and N₂O from the space-based remote sensor IASI (*Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*), on board the meteorological satellites EUMETSAT/Metop. In this work the INMENSE IASI CH₄ and N₂O products are presented, characterised and comprehensively validated by using a multi-platform reference database. This extensive validation exercise enables us to properly document the quality and long-term consistency of the new IASI CH₄ and N₂O products as well as their geographical uniformity. Finally, by comparing to chemical transport simulations, the kind of CH₄ and N₂O sink/source signals that can be captured by IASI observations will be analyzed.

Keywords: greenhouse gases, methane, nitrous oxide, IASI, INMENSE.

1. INTRODUCCIÓN

Múltiples evidencias en el sistema Tierra-atmósfera indican que el cambio climático es ya una realidad. Es ampliamente reconocido que el principal motor de este cambio está siendo el aumento de las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero (GEI)

(Stocker et al., 2013). Sin embargo, con nuestro conocimiento actual es difícil predecir exactamente su impacto o dar recomendaciones precisas sobre las reducciones en las emisiones de GEI necesarias para limitar el calentamiento global actual y futuro.

Después del dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O) son actualmente los GEI más importantes (Stocker et al., 2013). El desequilibrio entre sus fuentes y sumideros ha aumentado a niveles sin precedentes durante los últimos siglos, superándose los registros preindustriales (1750) en aproximadamente un 150% y un 20% para CH_4 y N_2O , respectivamente (Stocker et al., 2013). Sin embargo, la ubicación exacta, la intensidad y la naturaleza de sus fuentes y sumideros presenta aún grandes incertidumbres (Crevoisier et al., 2009).

Una de las principales limitaciones para abordar estos retos es la falta de observaciones precisas de la composición atmosférica en diferentes escalas espaciales y temporales. En este sentido, la monitorización desde el espacio juega un papel clave en la investigación del sistema climático. Entre los actuales sensores remotos a bordo de plataformas espaciales, el sensor IASI (*Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*) tiene una especial relevancia, ya que combina eficazmente los requisitos necesarios para la observación de gases traza atmosféricos, como el CH_4 y el N_2O (muy buena relación señal-ruido y una alta resolución espectral), con una larga disponibilidad de datos (su misión está garantizada entre 2007-2022 a bordo de la serie de satélites meteorológicos Metop de EUMETSAT - Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos). Estas características hacen que sea un componente clave del programa de observación del sistema climático Tierra-atmósfera.

En este contexto, el proyecto INMENSE (*IASI for Surveying Methane and Nitrous Oxide in the Troposphere*) explotará el potencial del sensor remoto IASI para proporcionar distribuciones globales de CH_4 y N_2O con el objetivo de mejorar nuestro conocimiento del balance de estos importantes GEIs en la atmósfera. Para ello, INMENSE conecta los tres pilares principales de las estrategias de observación actuales para la investigación de la composición atmosférica: 1) la cobertura global de las plataformas espaciales, 2) la alta calidad y frecuencia de las observaciones desde tierra, que serán empleadas como referencia de validación de los nuevos productos IASI, y 3) los modelos de transporte químico, que nos permitirán analizar en qué medida el sensor remoto IASI es capaz de observar la distribución geográfica de las emisiones de CH_4 y N_2O .

2. PROCESAMIENTO DE CH_4 Y N_2O IASI

2.1. Sensor IASI

El sensor remoto IASI es un espectrómetro de infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR), desarrollado conjuntamente por EUMETSAT y CNES (Centro Nacional de Estudios Espaciales). Este avanzado instrumento mide la radiación infrarroja térmica emitida por la superficie de la Tierra y la atmósfera entre $645\text{-}2760\text{ cm}^{-1}$ ($3,6\text{-}15,5\text{ }\mu\text{m}$). Escanea la superficie terrestre en píxeles individuales de aproximadamente 12 km de diámetro en el nadir, cubriendo una superficie horizontal de unos 2200 km. Esta configuración de medida proporciona aproximadamente 1,25 millones de espectros de IASI por día para ser analizados.

Este instrumento vuela a bordo de los satélites meteorológicos EUMETSAT Metop, que operan en órbita polar síncrona al Sol desde 2006. Con 14 órbitas al día proporcionan observaciones globales dos veces al día (09:30 y 22:30 tiempo solar local). Actualmente hay tres sensores IASI en órbita en Metop-A (desde 2006), Metop-B (desde 2012) y Metop-C (desde 2018), que operan en una órbita co-planar. Sus respectivos pasos superiores se realizan normalmente dentro de los 30 minutos, lo que ofrece muy buenas condiciones para combinar las observaciones de los tres sensores.

2.2. Estrategia de inversión de CH_4 y N_2O

El proyecto INMENSE emplea el procesador IASI desarrollado durante el proyecto europeo MUSICA (*MUlti-platform remote Sensing of Isotopologues for investigating the Cycle of Atmospheric water*, Schneider et al., 2016). Este procesador (en lo sucesivo procesador MUSICA IASI) deriva concentraciones de CH_4 y N_2O con diferentes isótopos de vapor de agua (junto a HNO_3), analizando el espectro térmico de emisión medido por el sensor IASI en el rango $1190\text{-}1140\text{ cm}^{-1}$ con el algoritmo de inversión PROFFIT-nadir (Schneider y Hase, 2011). Basado en el formalismo de Rodgers (2000), PROFFIT-nadir invierte perfiles de gases traza analizando la deformación de las líneas de absorción gaseosa debido a la presión atmosférica observada en los espectros de alta resolución IASI. Particularmente, los perfiles verticales de CH_4 y N_2O son derivados en escala logarítmica usando el método de inversión *ad-hoc* Tikhonov-Phillips. Debido a que las interferencias de vapor de agua son muy altas en la región espectral analizada, se emplea un sofisticado método de inversión basado en la aproximación de estimación óptima para derivar las concentraciones de los diferentes isótopos de vapor de agua y reducir así su influencia. La región analizada además incluye absorción de HNO_3 y de CO_2 , por lo que ambos gases son invertidos simultáneamente con el resto de especies. Por último, la estrategia de inversión también incluye la inversión simultánea del perfil de temperatura atmosférica, así como de la temperatura de la superficie.

La figura 1 muestra un ejemplo de la distribución global de CH_4 troposférico (4,2 km) invertido con el procesador MUSICA IASI.

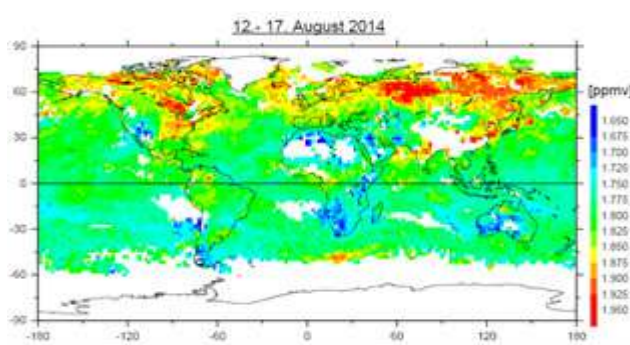


Figura 1. Ejemplo de la distribución global de CH_4 troposférico (4,2 km) en Agosto de 2014.

Además de los productos originales de MUSICA IASI CH_4 y N_2O , este trabajo analiza el potencial de usar las estimaciones simultáneas de N_2O para reducir

los errores en el producto de CH_4 . Este método se basa en la diferencia en escala logarítmica calculada *a posteriori* entre las estimaciones de CH_4 y N_2O . Mediante la corrección de errores comunes en los productos derivados de CH_4 y N_2O , la diferencia *a posteriori* puede ser usada para generar un producto de CH_4 *a posteriori* corregido con una precisión teórica mejor que los productos originales de CH_4 . Se discuten y evalúan dos métodos diferentes para esta corrección *a posteriori*. Para más detalles sobre los principios y características de la inversión consultar García et al. (2018).

3. COMPARACIÓN CON DATOS DE REFERENCIA

Para usar con total confianza los nuevos datos IASI es necesario documentar su precisión y consistencia tanto temporal como espacialmente. Para ello, INMENSE emplea una base de datos multi-plataforma como referencia de validación (Figura 2):

1. Perfiles de avión de CH_4 y N_2O de las cinco campañas del proyecto *HIAPER Pole-to-Pole Observation* (HIPPO) realizados entre 2009 y 2011.
2. Observaciones *in situ* continuas de CH_4 y N_2O realizadas entre 2007 y 2017 en observatorios de alta montaña situados en latitudes subtropicales y medias (Observatorio Atmosférico de Izaña y Jungfraujoch, respectivamente) en el contexto del programa WMO-GAW (*World Meteorological Organization-Global Atmosphere Watch*).
3. Medidas en superficie FTIR realizadas entre 2007 y 2017 en el contexto de la red NDACC (*Network for the Detection of Atmospheric Composition Change*) en la estación subtropical del Observatorio Atmosférico de Izaña, la estación de latitudes medidas de Karlsruhe y la estación polar de Kiruna.

Las estimaciones teóricas y los estudios de comparación sugieren una precisión para los productos CH_4 y N_2O de aproximadamente 1,5-3% y un error sistemático, debido a los parámetros espectroscópicos, del 2%. Los datos MUSICA IASI CH_4 ofrecen una mejor sensibilidad que los productos N_2O . Mientras que para este último la sensibilidad está principalmente limitada a la región de la UTLS (alta troposfera-baja estratosfera), para el CH_4 se ha documentado que a bajas latitudes el procesador MUSICA IASI puede detectar variaciones que tienen lugar en la troposfera libre independientemente de aquellas que se producen en la región de la UTLS. Se demuestra así que los datos MUSICA IASI pueden cualitativamente capturar los gradientes de CH_4 entre bajas y altas latitudes y entre el Hemisferio Sur y el Hemisferio Norte. Sin embargo, también se encuentra una inconsistencia entre las observaciones de CH_4 a bajas y altas latitudes de hasta el 5%. Los gradientes latitudinales del N_2O son muy débiles y no pueden ser detectados. Las comparaciones con los datos de referencia en un periodo de 10 años y en diferentes escalas temporales muestran que los datos MUSICA IASI pueden detectar las señales día-a-día (solamente en la UTLS), ciclos estacionales y evolución a largo plazo (en la UTLS y para el CH_4 también en la troposfera libre). Aunque existen inconsistencias en la evolución a largo

plazo vinculadas a inconsistencias en los datos a priori usados para la temperatura atmosférica.

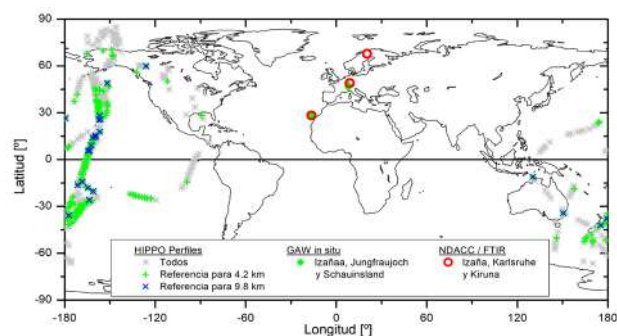


Figura 2. Bases de datos y estaciones empleadas para la validación de los productos IASI CH_4 y N_2O .

La comparación con datos de referencia en tierra también muestra que la corrección *a posteriori* del CH_4 elimina las inconsistencias entre bajas y altas latitudes y permite la detección de las señales día-a-día también en la troposfera libre. Además, reduce el impacto de las variaciones a corto plazo de la dinámica atmosférica, lo cual es una clara ventaja puesto que estas señales son difícilmente comparables a modelos. El método, que corrige únicamente aquellas escalas temporales en las cuales los errores dominan, se ha mostrado como el más eficiente debido a que reduce las inconsistencias y errores sin eliminar las señales atmosféricas reales.

4. COMPARACIÓN CON MODELOS QUÍMICOS DE TRANSPORTE

Las estimaciones de modelos de transporte químicos de transporte son herramientas muy valiosas para realizar validaciones extensas y rigurosas de las observaciones satelitales, pero también para ayudarnos a comprender hasta qué punto estas observaciones pueden capturar las las emisiones de CH_4 y N_2O y su transporte en la atmósfera. Por ello, INMENSE integrará las observaciones IASI con las simulaciones procedentes del modelos de transporte químico como el MOCAGE (*Modélisation de la Chimie Atmosphérique Grande Echelle*, Josee et al., 2004, Figura 3). Mediante esta estrategia integrada de observación/modelización, INMENSE investigará el tipo señales de fuentes y sumideros de CH_4 y N_2O que pueden ser capturadas por las observaciones de alta calidad IASI.

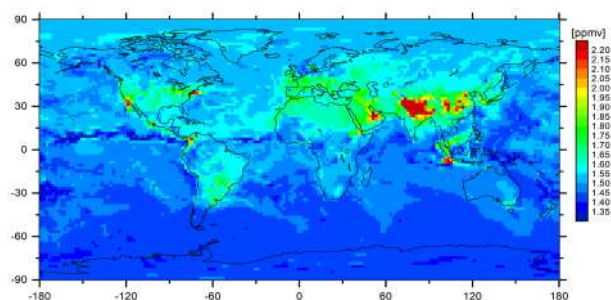


Figura 3. Ejemplo de la distribución global de CH_4 troposférico (en superficie) en Agosto de 2016 del MOCAGE.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Crevoisier, C., Nobileau, D., Fiore, A.M., Armante, R., Chédin, A., Scott, N. A. 2009. Tropospheric methane in the tropics – first year from IASI hyperspectral infrared observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 6337–6350, <https://doi.org/10.5194/acp-9-6337-2009>.
- García, O.E., Schneider, M., Ertl, B., Sepúlveda, E., Borger, C., Diekmann, C., Wiegeler, A., Hase, F., Barthlott, S., Blumenstock, T., Raffalski, U., Gómez-Peláez, A., Steinbacher, M., Ries, L., de Frutos, A.M. 2018. The MUSICA IASI CH₄ and N₂O products and their comparison to HIPPO, GAW and NDACC FTIR references, *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 4171-4215, <https://doi.org/10.5194/amt-11-4171-2018>.
- Josse, B., Simon P., V.-H. Peuch, Rn-222 global simulations with the multiscale CTM MOCAGE, *Tellus*, 56B, 339-356, 2004.
- Rodgers, C. 2000. *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Praxis*, World Scientific Publishing Co., Singapore, 2000.
- Schneider, M., Hase, F. 2011. Optimal estimation of tropospheric H₂O and δD with IASI/METOP, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 11207–11220, <https://doi.org/10.5194/acp-11-11207-2011>
- Schneider, M., Wiegeler, A., Barthlott, S., González, Y., Christner, E., Dyroff, C., García, O.E., Hase, F., Blumenstock, T., Sepúlveda, E., Mengistu-Tsidu, G., Takele-Kenea, S., Rodríguez, S., Andrey, J. 2016. Accomplishments of the MUSICA project to provide accurate, long-term, global and high-resolution observations of tropospheric {H₂O, δD } pairs – a review, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 2845-2875, [doi:10.5194/amt-9-2845-2016](https://doi.org/10.5194/amt-9-2845-2016).
- Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Tech. rep., pp 1535.