

Medida de las Concentraciones de Gases de Efecto Invernadero en Madrid (MEGEI-MAD)

García, O.⁽¹⁾, Sepúlveda, E.⁽¹⁾, Morgui, J.A.⁽²⁾, Frey, M.⁽³⁾, Schneider, C.⁽⁴⁾, Curcoll, R.⁽²⁾, Estruch, C.⁽²⁾, Ramos, R.⁽¹⁾, Torres, C.⁽¹⁾, León, S.⁽¹⁾, Hase, F.⁽³⁾, Butz, A.⁽⁴⁾, Toledano, C.⁽⁵⁾, Cuevas, E.⁽¹⁾, Blumenstock, T.⁽³⁾, Pérez, C.⁽⁶⁾, Guevara, M.⁽⁶⁾, Jorba, O.⁽⁶⁾, Marrero, C.⁽¹⁾, Bustos, J.J.⁽¹⁾, López-Solano, J.⁽¹⁾, Romero-Campos, P.M.⁽¹⁾

⁽¹⁾ Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (CIAI), Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Santa Cruz de Tenerife, España. ogarcia@aemet.es

⁽²⁾ Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals (ICTA)- Autonomous University of Barcelona, España.

⁽³⁾ Instituto de Tecnología de Karlsruhe, Karlsruhe, Alemania.

⁽⁴⁾ University of Heidelberg (UH), Alemania.

⁽⁵⁾ Grupo de Óptica Atmosférica, Universidad de Valladolid, España.

⁽⁶⁾ Centro de Supercomputación de Barcelona, España.

Resumen: Las áreas urbanas concentran actualmente el 50% de las emisiones globales de Gases de Efecto Invernadero (GEIs). Este porcentaje está aumentando, ya que la población mundial cada vez más se concentra en las áreas urbanas, y se estima que pase del 50% hoy en día al 70% en 2050. Consecuentemente, las medidas de las emisiones urbanas de GEIs, a escalas temporales y espaciales pequeñas, son cruciales para diseñar políticas efectivas de control y mitigación de los GEIs. En este contexto, este trabajo presenta el proyecto MEGEI-MAD (Medida de las Concentraciones de Gases de Efecto Invernadero en Madrid), que es la primera iniciativa española para la monitorización de las emisiones de GEIs en ambientes urbanos. En particular, MEGEI-MAD tiene como objetivo la caracterización completa de las emisiones urbanas de dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), en Madrid, la ciudad más densamente poblada de España. Este objetivo central fue abordado con una campaña de medidas llevada a cabo entre el 16 de Septiembre y el 9 de Octubre de 2018 en la zona metropolitana de Madrid, donde las observaciones de CO₂ y CH₄ en la columna total atmosférica fueron medidas simultáneamente con observaciones *in situ* a nivel de superficie.

Palabras clave: gases de efecto invernadero, dióxido de carbono, metano, MEGEI-MAD, FTIR.

Monitoring of the Greenhouse Gases Concentrations in Madrid (MEGEI-MAD)

Abstract: Urban areas currently contribute over 50% of the global emissions of Greenhouse Gases (GHGs). This percentage is growing since worldwide population is increasingly concentrating in the urban areas, going from over 50% nowadays to 70% by 2050. Consequently, monitoring urban GHGs emissions at small temporal and spatial scales is crucial to design effective GHGs control and mitigation policies. In this context, this work gives an overview of the project MEGEI-MAD (Monitoring of the Greenhouse Gases Concentrations in Madrid), which is the first Spanish initiative to monitor GHGs emissions in urban environments. Particularly, MEGEI-MAD aims to comprehensively characterize the urban emissions of carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) of Madrid, the highest population density city in Spain. This core objective was reached by a field campaign carried out between 16th September-9th October 2018 in the Madrid Metropolitan area, where CO₂ and CH₄ total column amounts observations have been measured simultaneously with ground-level records.

Keywords: greenhouse gases, carbon dioxide, methane, MEGEI-MAD, FTIR.

1. INTRODUCCIÓN

Múltiples evidencias en el sistema Tierra-atmósfera indican que el cambio climático es ya una realidad, y los gases de efecto invernadero (GEIs) tienen un papel crucial, como uno de los principales motores de este cambio (Stocker et al., 2013). La identificación y cuantificación de las fuentes/sumideros de GEIs, así como una mejor comprensión de los complejos procesos de retroalimentación climática son, por lo tanto, unos de los principales desafíos de la investigación atmosférica actual.

Esto es especialmente crítico para las zonas urbanas, ya que, por una parte, son particularmente vulnerables a la contaminación del aire, los fenómenos meteorológicos extremos y los efectos del cambio climático (OMM, 2018). Pero, por otra parte, las áreas urbanas son uno de

los grandes focos de emisión de GEIs: actualmente concentran el 70% de las emisiones de CO₂ y hasta un 50% de las emisiones globales de GEIs (Stocker et al., 2013). Además, esta situación se prevé que empeore en un futuro cercano, ya que los ambientes urbanos se estima que concentren el 70% de la población mundial en 2050 frente al 50% actual (OMM, 2018). Por tanto, el papel de las ciudades es clave en este escenario de cambio climático, desarrollando políticas efectivas de control y reducción de las emisiones de GEIs, así como políticas de mitigación adecuadas. No obstante, para diseñar estas políticas es indispensable disponer de medidas experimentales de las concentraciones (y flujos de emisión) de GEIs en las áreas urbanas.

Con esta idea nace el proyecto MEGEI-MAD para la medida de las concentraciones atmosféricas de dos de los principales GEIs, dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), en la zona metropolitana de Madrid (España). Para ello, se combinan las medidas en la columna atmosférica obtenidas de espectrómetros de infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) EM27/SUN (Frey *et al.*, 2019), con medidas *in situ* superficiales (Morgui *et al.*, 2013) y con simulaciones del modelo de emisión HERMES v3.0 (Guevara *et al.*, 2018). Durante MEGEI-MAD también se tomaron medidas de las propiedades ópticas de aerosoles, empleando fotómetros CIMEL (Toledano *et al.*, 2018). La idea final del proyecto es combinar las diversas técnicas para conseguir una caracterización completa de las emisiones antrópicas de GEIs y partículas de Madrid. Si bien, este trabajo se centra solo en la presentación del proyecto MEGEI-MAD y de las observaciones de columna e *in situ* de GEIs tomadas durante la campaña de medida.

MEGEI-MAD es coordinado por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), pero participan diversas instituciones europeas y nacionales: Instituto de Tecnología de Karlsruhe (KIT, Alemania), Universidad de Heidelberg (Alemania), Universidad Autónoma de Barcelona, Universidad de Valladolid y el Centro Nacional de Supercomputación en Barcelona.

2. METODOLOGÍA

2.1. Medidas en Columna

Las medidas en la columna atmosférica de CO_2 y CH_4 fueron adquiridas con espectrómetros FTIR Bruker EM27/SUN, pertenecientes a la red COCCON (Frey *et al.*, 2019). Este espectrómetro, basado en un interferómetro RockSolid™, adquiere espectros de absorción solar en la región del infrarrojo cercano desde 5000 a 11000 cm^{-1} con una resolución espectral de $0,5 \text{ cm}^{-1}$. Estos espectros de absorción son analizados mediante el algoritmo de inversión PROFFIT v9.6 (Frey *et al.*, 2019 y referencias ahí), obteniéndose las columnas totales de diferentes gases traza (O_2 , CO_2 , CH_4 , CO , y H_2O).

Para comparar las medidas de los diferentes EM27/SUN es necesario realizar una primera fase de intercomparación. De esta manera, se descartan posibles problemas instrumentales, se analiza la estabilidad temporal de los diferentes instrumentos, y se establecen los factores de calibración entre los mismos. Esta corrección es fundamental para poder asignar la variabilidad observada en las medidas a causas reales y no a factores instrumentales. Esta fase de intercomparación se realizó en la sede central de AEMET durante los días 17-19 Septiembre y 8-9 de Octubre (Figura 1). Los factores de calibración obtenidos entre los 5 EM27/SUN empleados durante MEGEI-MAD variaron entre 0,9992-1,0007 para CH_4 y entre 0,9998-1,0001 para CO_2 , lo que supone una diferencia entre instrumentos del 0,08% y del 0,02% para el CH_4 y CO_2 , respectivamente.

Combinando las medidas de varios espectrómetros EM27/SUN se puede obtener información de los flujos de emisión (y emisiones totales) de una región fuente. Para ello, empleamos el método del “balance de masas” (Viatte *et al.*, 2017), y situamos la instrumentación perimetrando



Figura 1. Intercomparación de la instrumentación de la campaña MEGEI-MAD (espectrómetros EM27/SUN y fotómetros CIMEL) en la sede central de AEMET.

la región fuente (zona metropolitana de Madrid), y en la dirección de los vientos predominantes regionales. De esta forma, las medidas a barlovento de Madrid, antes de que la masa de aire llegue a la ciudad, serán la referencia limpia, mientras que las observaciones a sotavento, cuando la masa de aire ya haya atravesado Madrid, arrastrarán consigo las emisiones antrópicas de GEIs de la ciudad. La figura 2 muestra la configuración de cinco estaciones seleccionadas, las cuales son instalaciones cedidas por la AEMET, el aeropuerto Cuatro Vientos, el Colegio Tres Olivos y el Colegio José de Echegaray. Desde estas cinco estaciones se tomaron medidas simultáneas desde el orto al ocaso desde el 24 de Septiembre al 7 de octubre (fase de campaña).

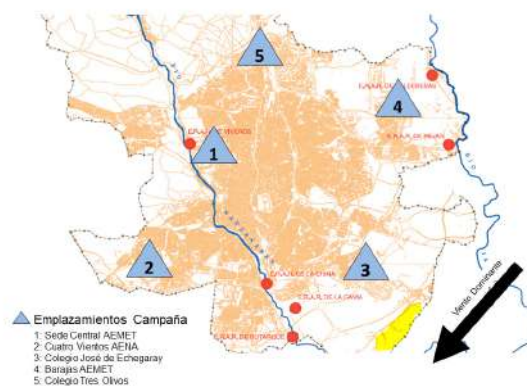


Figura 2. Emplazamientos donde se instaló la instrumentación fija y dirección del viento predominante regional.

2.2. Medidas Superficiales

Las medidas en columna se complementaron con observaciones recogidas con analizadores superficiales de CO_2 y CH_4 de alta precisión en una estación fija (sede central de AEMET, Estación 1 en la figura 2) y móviles a lo largo de la autopista de circunvalación M-40, la cual perimetra la zona metropolitana de Madrid.

En el primer caso, se empleó un analizador LGR que adquirió de forma continua durante las dos semanas de la campaña, mientras que las medidas móviles se realizaron en dos transeptos diarios por la M-40 (sentido antihorario) entre las 08-10 y 14-16 UTC a una velocidad constante de 60 km/h , con un analizador Picarro G-2301-m, a 1 Hz

de frecuencia de adquisición. Ambos instrumentos fueron calibrados diariamente frente a dos estándares, los cuales a su vez estaban referenciados frente estándares NOAA (*National Ocean and Atmospheric Administration*).

Estas medidas superficiales urbanas se complementan con las medidas de fondo regional de CO_2 y CH_4 , que se adquieren rutinariamente en el contexto de la red ClimaDat (Morgui et al., 2013).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 3 muestra un ejemplo típico de las observaciones de CO_2 y CH_4 registradas por las cinco estaciones EM27/SUN y las adquiridas a nivel de superficie a lo largo de la autopista M-40. Este ejemplo corresponde al 29/09/2018, cuando existe una situación anticiclónica de estancamiento sobre la ciudad de Madrid con un flujo del SE débil. Como se observa, ambas técnicas capturan consistentemente la pluma de CH_4 , originada en el SE de la ciudad, y que se traslada hacia el NW a lo largo del día. Se identifica así una fuente puntual de CH_4 asociado probablemente al tratamiento y gestión de residuos urbanos, como recoge el PRTR (Registro Estatal de Emisiones

y Fuentes Contaminantes). En el caso del CO_2 , las concentraciones observadas son homogéneas espacialmente y no se detecta ninguna fuente puntual significativa. La zona metropolitana de Madrid, en este caso, se comporta como una fuente difusa de CO_2 , estando las emisiones de este GEI principalmente asociadas al tráfico rodado y a las zonas residenciales, comerciales e institucionales (Ayuntamiento de Madrid, 2018).

La combinación de técnicas de medida propuesta en MEGEI-MAD demuestra así tener un gran potencial para realizar una caracterización completa de las emisiones urbanas. Mientras que las medidas en columna proporcionan una imagen regional de las emisiones, no estando por tanto afectadas por fuentes muy locales, las medidas superficiales pueden detectar fuentes secundarias no observadas en las medidas en columna. Los resultados de esta campaña piloto suponen, por tanto, un importante avance en la medida de las emisiones reales de gases de efecto invernadero en ambientes urbanos, ya que en la actualidad se trabaja con datos estimados recogidos en los correspondientes inventarios de emisiones (e.j. Ayuntamiento de Madrid, 2018).

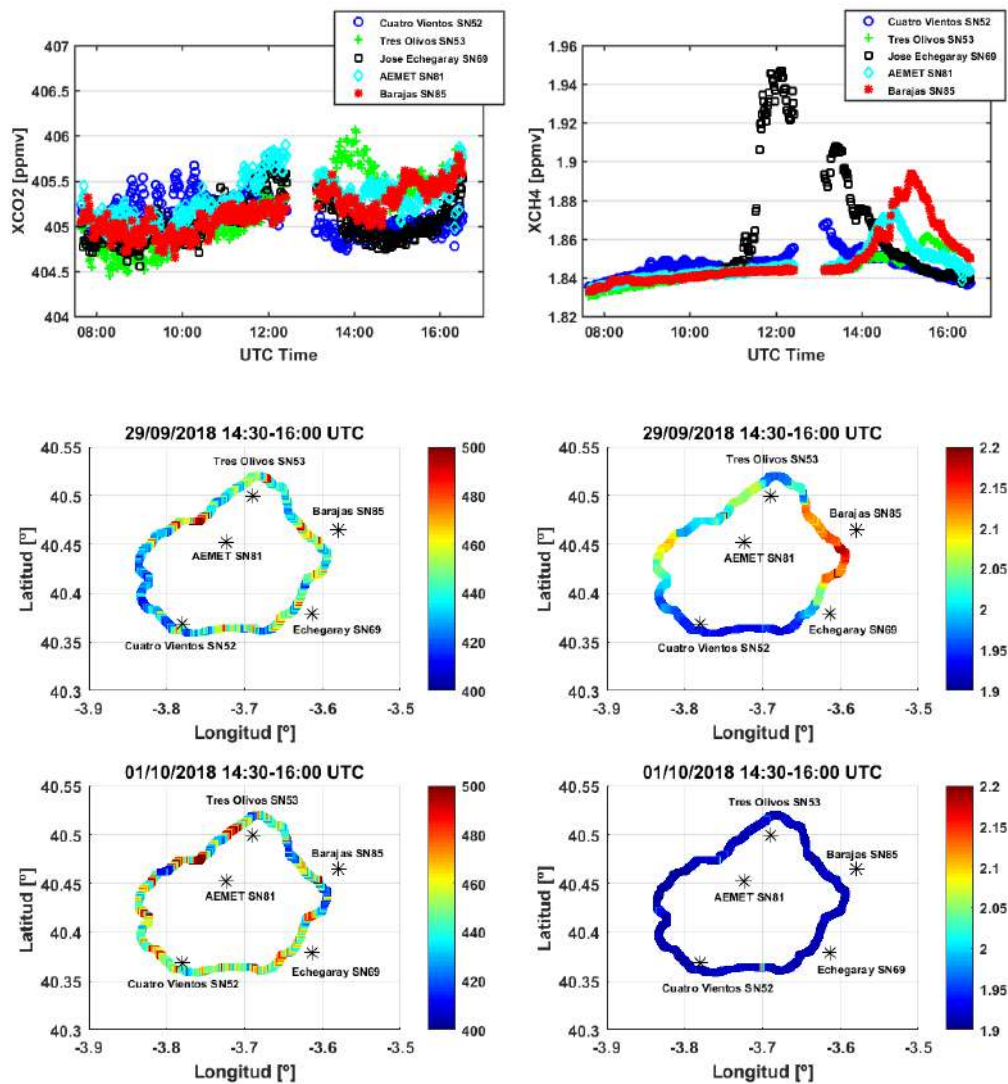


Figura 3. Panel superior: Medidas de $X\text{CO}_2$ y $X\text{CH}_4$ obtenidas con espectrómetros EM27/SUN en las cinco estaciones de la campaña para el 29/09/2018. Panel inferior: Medidas in situ tomadas en la autopista de circunvalación M-40 entre las 14:30-16:00 UTC del mismo día.

4. BIBLIOGRAFÍA

- Ayuntamiento de Madrid, 2018. Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero del municipio de Madrid 2015.
- Guevara, M., Tena, C., Porquet, M., Jorba, O., Pérez García-Pando, C., 2019. HERMESv3, a stand-alone multiscale atmospheric emission modelling framework – Part 1: global and regional module, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/gmd-2018-324>, in review.
- Frey, M., Sha, M.K., Hase, F., Kiel, M., Blumenstock, T., Harig, R., Surawicz, G., Deutscher, N.M., Shiomi, K., Franklin, J.E., Bösch, H., Chen, J., Grutter, M., Ohyama, H., Sun, Y., Butz, A., Mengistu-Tsidu, G., Ene, D., Wunch, D., Cao, Z., Garcia, O., Ramonet, M., Vogel, F., Orphal, J., 2019. Building the COllaborative Carbon Column Observing Network (COCCON): long-term stability and ensemble performance of the EM27/SUN Fourier transform spectrometer, *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 1513-1530, <https://doi.org/10.5194/amt-12-1513-2019>.
- Morgui, J.A., Agueda, A., Batet, O., Curcoll, R., Ealo, M., Grossi, C., Occhipinti, P., Sánchez-García, L., Arias, R., Rodó, X., 2013. ClimaDat: A long-term network to study at different scales climatic processes and interactions between climatic compartments, EGU General Assembly, Vienna, EGU2013-10265, 7-12 Abril.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM), <https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/urban-development-megacities>, 2018.
- 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.
- Toledano, C., González, R., Fuertes, D., Cuevas, E., Eck, T.F., Kazadzis, S., Kouremeti, N., Gröbner, J., Goloub, P., Blarel, L., Román, R., Barreto, Á., Berjón, A., Holben, B.N., Cachorro, V. E., 2018. Assessment of Sun photometer Langley calibration at the high-elevation sites Mauna Loa and Izaña, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 14555-14567, <https://doi.org/10.5194/acp-18-14555-2018>.
- Viatte, C., Lauvaux, T., Hedelius, J.K., Parker, H., Chen, J., Jones, T., Franklin, J.E., Deng, A.J., Gaudet, B., Verhulst, K., Duren, R., Wunch, D., Roehl, C., Dubey, M.K., Wofsy, S., Wennberg, P.O., 2017. Methane emissions from dairies in the Los Angeles Basin, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 7509-7528, <https://doi.org/10.5194/acp-17-7509-2017>.