

EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES DE ACIDIFICADORES, PRECURSORES DE OZONO Y GASES DE EFECTO INVERNADERO EN EL PERIODO 1990-2005 EN ESPAÑA. MODELIZACIÓN FOTOQUÍMICA DE LA REDUCCIÓN DE PRECURSORES DEL OZONO

Núria CASTELL¹, Rosa SALVADOR¹, Enrique MANTILLA¹,
Ariel F. STEIN², Millán MILLÁN¹

¹ *Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo, CEAM*

² *Earth Resources and Technology on assignment to NOAA/Air Resources Lab.*

nuria@ceam.es

RESUMEN

La Unión Europea promulgó en 2001 la Directiva 2001/81/EC en la que se establecen los techos de emisión de acidificadores y precursores de ozono que deberán alcanzarse en 2010. El inventario nacional de emisiones (hasta 2005) muestra que las emisiones se sitúan por encima de los techos establecidos. Una pauta similar se observa también para las emisiones de gases de efecto invernadero en el marco del Protocolo de Kioto.

En este estudio se estima el impacto sobre las concentraciones de ozono de un hipotético control de emisiones (reducciones del 25% en NO_x y COVNM procedentes de la industria y el tráfico) para la Península Ibérica (PI) durante dos episodios de contaminación fotoquímica. Las simulaciones numéricas muestran reducciones horarias en las concentraciones en superficie de ozono en torno a los 30 µg/m³, lo que supone una mejoría en la calidad del aire en grandes áreas de la PI.

Palabras clave: Protocolo de Gothenburg, evolución temporal de las emisiones, reducción de precursores de ozono, modelización fotoquímica.

ABSTRACT

In 2001, the European Union enacted Directive 2001/81/EC with the aim of limiting emissions of acidifying and eutrophying pollutants and ozone precursors by establishing national emissions ceilings for SO₂, NO_x, NMVOC and NH₃, to be attained by 2010. The national emissions inventory for Spain (up to 2005) shows that the emissions exceed the established ceilings. A similar trend is also observed for greenhouse gas emissions in the framework of the Kyoto Protocol.

In this study we evaluate the impact on ozone concentrations of a hypothetical emissions control (25% reductions in NO_x and NMVOC from industry and traffic) during two episodes of photochemical pollution in the Iberian Peninsula. The simulations show hourly surface ozone reductions of around 30 µg/m³, which represents an improvement in air quality over large areas of the Peninsula.

Key words: Gothenburg Protocol, emission temporal evolution, reduction of ozone precursors, photochemical modeling.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es uno de los grandes problemas a los que se enfrentan tanto los científicos como las autoridades encargadas de la gestión ambiental. El carácter transfronterizo de la misma hace necesario que las decisiones se tomen en un marco global que involucre a todos los países.

La deposición de especies acidificadoras puede tener efectos adversos sobre los materiales y la vegetación, así como contribuir a la acidificación de arroyos y lagos, causando daños importantes sobre el ecosistema acuático. El dióxido de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) procedentes de la combustión de fuel contribuyen a la acidificación. También el amoníaco (NH_3) juega un papel importante en el transporte a larga distancia de acidificadores debido a la formación de material particulado relativamente estable. La deposición del amoníaco en suelos tiene un efecto indirecto en la acidificación, debido a la transformación biológica de NH_4 a NO_3 (nitrificación) y a la absorción por parte de las plantas. Por otro lado, el NH_3 también puede incrementar la eutroficación (exceso de minerales y nutrientes).

El ozono es un contaminante secundario, que se forma en la atmósfera a partir de reacciones químicas de otros compuestos primarios, principalmente óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles distintos al metano (COVNM). La circulación atmosférica puede transportar dichos compuestos y dar lugar al aumento de ozono en regiones muy alejadas del origen de las emisiones. El ozono es el oxidante más importante presente en los niveles inferiores de la atmósfera, lo que le convierte en un compuesto potencialmente peligroso dada su capacidad para reaccionar con la mayoría de los compuestos, degradándolos (oxidación, corrosión, etc.). Ello afecta tanto a los materiales como a los propios seres vivos, que se ven expuestos a su acción, externamente pero también internamente, en el intercambio de gases que tiene lugar por la respiración.

El Protocolo de Gothenburg, adoptado en 1999, establece las reducciones en las emisiones de dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, amoníaco, y compuestos orgánicos volátiles producidos por la actividad humana. Una vez el Protocolo se implemente de forma completa los escenarios de emisiones en Europa se verán reducidos en al menos un 63% para el SO_2 , un 41% para los NO_x , un 40% para los COVNM y un 17% para el NH_3 comparado con los niveles de 1990. En reflejo del Protocolo de Gothenburg, la Unión Europea promulgó en 2001 la Directiva 2001/81/EC relativa a los techos nacionales de emisión de dichos contaminantes, que deberán alcanzarse en 2010 (CE, 2001).

Los gases de efecto invernadero absorben los fotones infrarrojos emitidos por el suelo (calentado por el sol), aumentando su energía de rotación y de vibración. El exceso de energía es transferido a otras moléculas, por las colisiones moleculares, en forma de energía cinética (calor), lo que contribuye a aumentar la temperatura del aire. El Protocolo de Kioto sobre el cambio climático es un acuerdo internacional que tiene por objeto reducir las emisiones de seis gases: dióxido de carbono (CO_2), gas metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), además de tres gases de origen industrial (no se encuentran de forma natural en la atmósfera), hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs) y hexafluoruro de azufre (SF_6), en un porcentaje aproximado de un 5%, dentro del periodo que va del año 2008 al 2012, en comparación las las emisiones del año 1990.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS Y METODOLOGÍA

En primer lugar se estudiará la evolución de las emisiones atmosféricas desde 1990 a 2005, tomando el año 1990 como año base se calcula el porcentaje de variación (V) para cada uno de los contaminantes como:

$$V = \left[\frac{E - E_{1990}}{E_{1990}} \right] \quad (1)$$

donde E son las emisiones para cada año, y E_{1990} las emisiones de 1990.

Se analizará también la contribución de cada uno de los sectores definidos en el inventario nacional de emisiones a las emisiones antropogénicas totales de: NO_x, COVNM, CO, y CO₂.

En segundo lugar se modelizará la respuesta del ozono a una supuesta reducción del 25% en las emisiones antropogénicas de NO_x y COVNM, para los días centrales de dos episodios de verano en los que se registraron concentraciones elevadas de ozono: 13 de agosto de 2003 y 17 de junio de 2004.

2.1. Inventario de emisiones nacional

El inventario nacional de emisiones elaborado por el Ministerio de Medio Ambiente, cubre la serie temporal de 1990-2005, para las emisiones de gases acidificadores, precursores de ozono y gases de efecto invernadero, divididas en un total de 10 sectores de actividades humanas y 1 sector de emisiones biogénicas (INE, 1990; 2005):

1. Combustión en la producción y transformación de energía (centrales térmicas, plantas de refino, etc.).
2. Plantas de combustión no industrial (secor comercial y residencial, y agricultura).
3. Plantas de combustión industrial.
4. Procesos industriales sin combustión.
5. Extracción y distribución de combustibles fósiles y energía geotérmica.
6. Uso de disolventes y otros productos.
7. Transporte por carretera.
8. Otros modos de transporte y maquinaria móvil (ferrocarril, actividades marítimas, tráfico aéreo, etc.).
9. Tratamiento y eliminación de residuos.
10. Agricultura.
11. Otras fuentes y sumideros (naturaleza)

Los contaminantes contemplados son: SO_x (SO₂ + SO₃), NO_x (NO+NO₂), COVNM, CH₄, CO, CO₂, N₂O, NH₃, SF₆, HFC, PFC.

2.2. Modelización meteorológica y fotoquímica

Para la modelización meteorológica se ha empleado el modelo euleriano de mesoescala MM5 (GRELL, *et al.*, 1995), utilizando dos mallas anidadas, una primera de 72km de resolución

horizontal cubriendo buena parte de Europa y norte de África, y una malla de 24 km de resolución horizontal cubriendo la Península Ibérica. Ambas con 30 niveles verticales hasta una altura de unos 15 km, con mayor resolución en las capas cercanas a la superficie (SALVADOR, 2006). Para la modelización fotoquímica se empleó el modelo euleriano CAMx con el mecanismo químico CB-IV (ENVIRON, 2006), en el dominio peninsular con resolución horizontal de 24 km y vertical hasta 5 km (CASTELL, 2007; MANTILLA, *et al.*, 2006)

Las emisiones biogénicas se estimaron a partir de los usos de suelo CORINE (EIONET, 2008) y los algoritmos de Guenther, aplicando factores de emisión y biomasa característicos del entorno mediterráneo (CASTELL, 2006). Las emisiones antropogénicas se obtuvieron del proyecto EMEP (EMEP, 2008).

Se modelizaron dos periodos de verano en los que se registraron concentraciones elevadas de ozono: 10-15 de agosto de 2003 y 14-19 de junio de 2004. Los resultados del modelo fotoquímico se contrastaron con un total de 8 estaciones EMEP distribuidas sobre el territorio español (NILU, 2008), comprobándose que se cumplen los requisitos de la Directiva 2002/3/CE, en la que se demanda que la incertidumbre no supere el 50% (CE, 2002) para sendos episodios.

3. RESULTADOS

3.1. Evolución de las emisiones atmosféricas desde 1990 a 2005

En la tabla 1 se muestran las emisiones en valores absolutos para 1990 y 2005 y los techos de emisión impuestos en la Directiva 2001/81/EC para precursores del ozono para 2010, y el compromiso asumido por España en el protocolo de Kioto de un aumento máximo del 15% en relación a 1990 para los gases de efecto invernadero (para SF₆, HFC y PFC el año base se establece en 1995) para 2012.

En relación a los precursores de ozono y acidificadores se observa que las emisiones para 2005 se encuentran por encima de los techos de emisión, incluso en el SO_x, para el que se ha registrado un descenso del 42% en relación a 1990.

La tendencia en los gases de efecto invernadero (GEI) no es tampoco diferente, cumpliéndose el compromiso de Kioto sólo en las emisiones de PFC. Destaca el elevado incremento del resto de gases industriales que supera el 1000% para HFCs, y el 300% para SF₆. Las emisiones de CO₂ se situaron en 2005 un 61% por encima de las inventariadas para 1990. Si se calcula la contribución de los gases invernadero como CO₂ equivalente, la variación relativa es de un incremento del 52% respecto al año base.

En las figuras 2, 3 y 4 se muestra la evolución de las emisiones a lo largo del período inventariado para los sectores de actividad 1 (producción y transformación de energía), 2 (sector comercial y residencial) y 7 (tráfico rodado), respectivamente. En el sector 1 destaca el incremento en los precursores de ozono de casi un 40% en los óxidos de nitrógeno y del 15% en los compuestos orgánicos volátiles. En los acidificadores, el SO_x se reduce en un 40%, pero el NH₃ se incrementa en un 14%. Los GEI experimentan incrementos elevados en este sector, con un 156% en el N₂O y un 60% en el CO₂.

Contaminante	1990	1995	2005	Techo
Sox (kt)	2167		1254	746 (SO ₂)*
NO _x (kt)	1244		1525	847 *
COVNM (kt)	1426		1320	662 *
CH ₄ (kt)	1320		1775	1518 (+15%)
CO(kt)	3701		2329	
CO ₂ (kt)	228517		368282	262795 (+15%)
N ₂ O (kt)	68		74	79 (+15%)
NH ₃ (kt)	339		401	353 *
SF ₆ (t)	2800	4533	11365	5213 (+15%)
HFC (kg)	205400	399110	2269989	458977 (+15%)
PFC (kg)	131825	123961	35943	142555 (+15%)

Tabla 1: EMISIONES ANTROPOGÉNICAS PARA 1990 Y 2005, Y TECHOS DE EMISIÓN A ALCANZAR EN 2010-2012 SEGÚN: (*) DIRECTIVA 2001/81/EC Y COMPROMISO DE ESPAÑA EN EL PROTOCOLO DE KIOTO [FUENTE: INE, 1990; 2005].

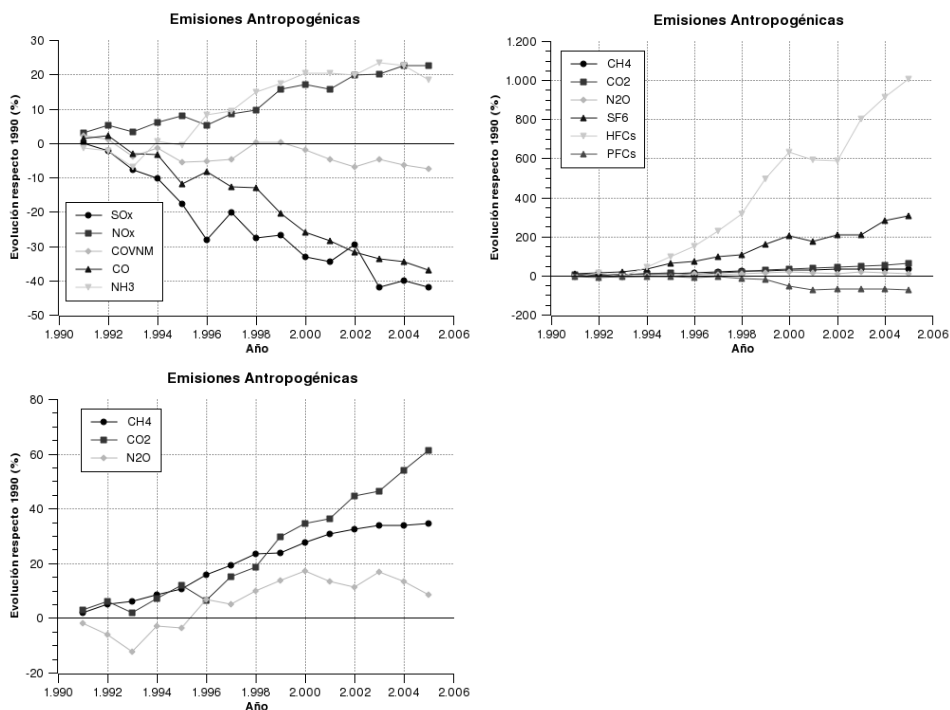


Fig. 1: Evolución temporal 1990-2005 del total de las emisiones antropogénicas tomando 1990 como año base.

En las emisiones comerciales, institucionales y residenciales (figura 3) las emisiones de SOx, COVNM, CH₄ y CO se reducen, pero el NOx y el CO₂ se incrementan en un 33% y un 70%, respectivamente.

La evolución temporal en el transporte (figura 4) por carretera muestra una reducción de casi el 100% en las emisiones de SOx, y reducciones importantes en COVNM, CH₄ y CO, manteniéndose las emisiones de NOx sin apenas variaciones. Sin embargo, en relación al NH₃ este ha experimentado un incremento superior a 1800% respecto a los niveles de 1990. El CO₂ y N₂O también muestran incrementos destacados, del 84% y el 280%, respectivamente.

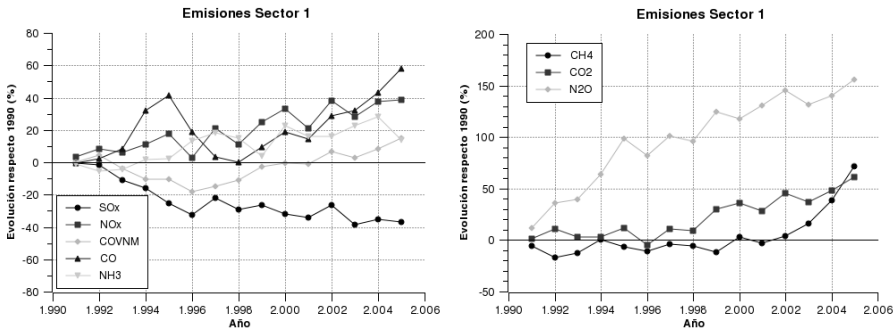


Fig. 2: Evolución temporal 1990-2005 de las emisiones antropogénicas correspondientes al sector 1, tomando 1990 como año base.

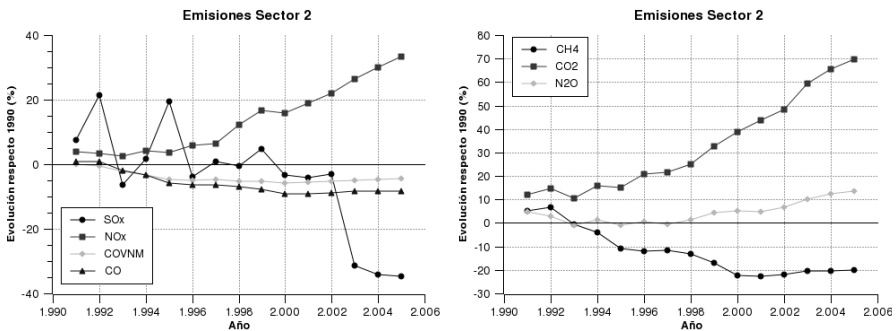


Fig. 3: Evolución temporal 1990-2005 de las emisiones antropogénicas correspondientes al sector 2, tomando 1990 como año base.

En relación a la contribución por sectores (figura 5) se observa para los precursores del ozono que el NOx se distribuye principalmente (ordenados de mayor a menor) entre los sectores 7, 1, 3 y 8 (94%), y las mayores emisiones de COVNM (excluyendo las biogénicas que contribuyen con un 53% del total), se deben a los sectores 6, 10, 4 y 7 (85%). El tráfico rodado, contribuye a las emisiones de los dos precursores principales del ozono, con el 34% y el 14 % de las emisiones antropogénicas totales de NOx y COVNM, respectivamente.

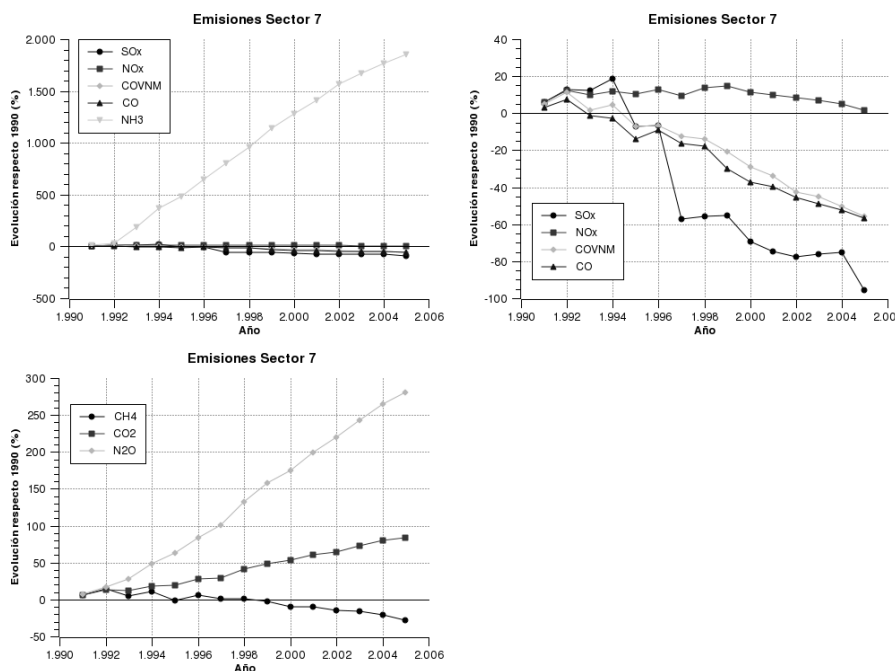


Fig. 4: Evolución temporal 1990-2005 de las emisiones antropogénicas correspondientes al sector 7, tomando 1990 como año base.

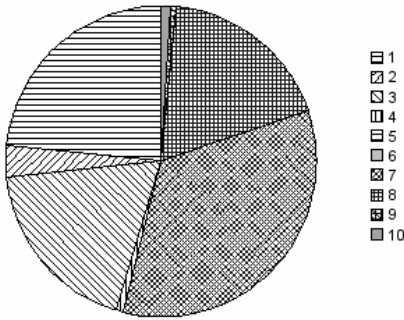
Las emisiones de acidificadores se distribuyen mayoritariamente, para el SO_x en los sectores: 1 (81%) y 3 (9%) y para el NH₃ en el sector 10 (92%). Las emisiones de gases de efecto invernadero se reparten de la siguiente forma: CH₄ sectores 10 y 9 (92%); CO₂ sectores 1, 7 y 3 (77%); N₂O sectores 10 y 7 (79%); SF₆ sector 6 (100%); HFCs sector 6 (96%) y 4 (4%); y PFCs sector 4 (60%) y 6 (40%).

El CO participa de forma indirecta en el forzamiento radiativo debido a que eleva las concentraciones de metano y de ozono troposférico a través de las reacciones químicas con otros compuestos presentes en la atmósfera. También a través de procesos naturales en la atmósfera, el CO es finalmente oxidado a dióxido de carbono (CO₂). Los principales sectores involucrados en las emisiones de CO son el 7 (transporte por carretera), 2 (residencias, comercios) y 4 (procesos industriales sin combustión), representando estos tres sectores el 83% del total de emisiones de monóxido de carbono.

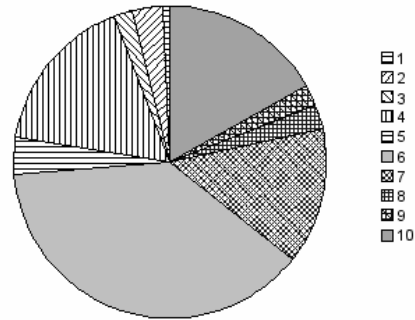
3.2. Respuesta del ozono a una reducción del 25% en sus precursores

Las simulaciones fotoquímicas muestran una reducción en las concentraciones horarias de ozono tras aplicar una reducción del 25% en las emisiones antropogénicas de NO_x y COVNM, con valores horarios que se sitúan por encima de los 30 µg/m³.

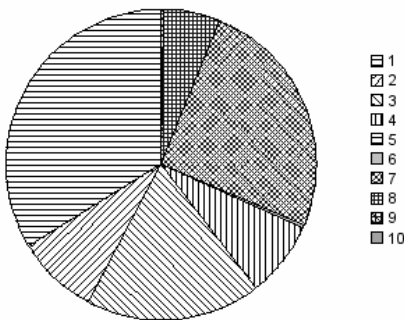
Distribución NOx por sectores (2005)



Distribución COVNM por sectores (2005)



Distribución CO2 por sectores (2005)



Distribución CO por sectores (2005)

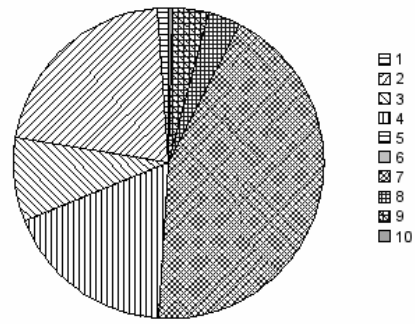


Fig. 5: Contribución de los diferentes sectores definidos en el Inventario nacional de emisiones a las emisiones antropogénicas de NOx, COVNM, CO2 y CO, para el año 2005 .

Las reducciones se inician sobre las 9 UTC, siendo más importantes a sotavento de las grandes áreas de emisión, abarcando a las 13 UTC gran parte del territorio peninsular, con excepción de las zonas donde se emiten grandes emisiones de NOx, como son las ciudades. En estos puntos, una reducción en NOx puede traducirse en un incremento en los niveles de ozono, debido a que se reducen las emisiones frescas de NO que reaccionan con el ozono, consumiéndolo (titulación). Esto es especialmente destacado en el área de Lisboa, caracterizada por elevadas emisiones de NOx. A partir de las 20 UTC los niveles de ozono permanecen sin cambios significativos en la mayor parte de la Península, aunque se mantienen por debajo del escenario base en las áreas a sotavento de las grandes ciudades.

La reducción en las concentraciones horarias se da en las áreas donde se registran las concentraciones más elevadas de ozono, lo que conduce a una menor superación de los umbrales de información y alerta a la población ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como valor horario) y de protección a la salud ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como máximo octohorario) (CE, 2002).

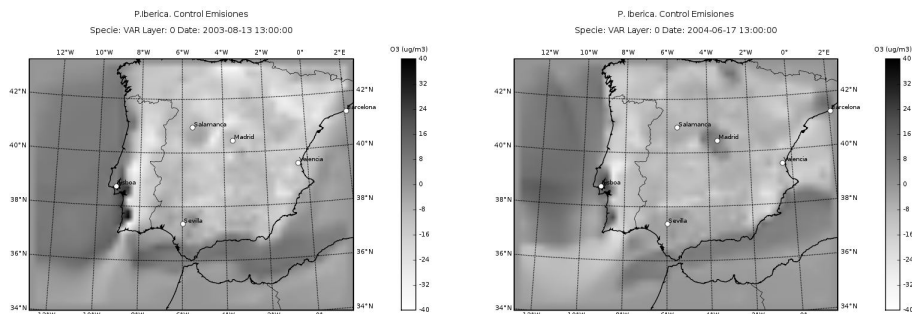


Fig. 6: Distribución espacial de la diferencia horaria entre el escenario con 25% de reducción en NO_x y COVNM de origen antropogénico y el escenario base para las jornadas del 13 de agosto de 2003 y el 17 de junio de 2004 a las 13 UTC. Los valores negativos indican una reducción en las concentraciones de ozono respecto al escenario base.

4. CONCLUSIONES

En este estudio se pone de manifiesto, a partir de los datos suministrados en el Inventario nacional de emisiones, que las emisiones de precursores de ozono se sitúan en 2005 un 50% por encima del umbral que habría que alcanzar en 2010 como requisito de la Directiva Europea.

En relación a los gases de efecto invernadero, tampoco se cumple el compromiso de un crecimiento máximo de un 15% respecto a las emisiones de 1990, sobrepasando en 2005 los valores de emisión para el cumplimiento del Protocolo de Kioto.

El escenario para las emisiones de acidificadores se sitúa en valores del 40 % y del 12% por encima de los requeridos para 2010 en SO₂ y NH₃.

Las simulaciones fotoquímicas muestran como una reducción del 25% en las emisiones antropogénicas de óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos distintos al metano (COVNM) reduciría las concentraciones horarias de ozono hasta en 30 µg/m³, lo que supondría una reducción en las superaciones de los umbrales de información y protección a la salud en la Península Ibérica.

5. AGRADECIMIENTOS

La Fundación CEAM está cofinanciada por la Generalitat Valenciana y Bancaixa, y participa en el Programa CONSOLIDER - INGENIO 2010 (Proyecto GRACCIE). Esta investigación forma parte del proyecto PREVIOZONO, financiado por la Generalitat Valenciana.

6. REFERENCIAS

- CASTELL, N., MANTILLA, E., SALVADOR, R., STEIN, A. F., HERNÁNDEZ, L., MILLÁN, M. (2006). "Emission Inventory for a photochemical modelling exercise over the south-west of Spain". *6th Annual Meeting of the EMS/6th ECAC*.
- CASTELL, N., SALVADOR, R., MANTILLA, E., MILLÁN, M. (2007). "A strategy for impact assessment using air quality models: an application in the Iberian Peninsula". *7th EMS Annual Meeting and 8th European Conference on Applications of Meteorology*.
- CE. (2001). Directive 2001/81/EC of the european parliament and the council of 23 october 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants.
- CE. (2002). Directiva 2002/3/EC del parlamento europeo y del consejo de 12 de febrero de 2002 relativa al ozono en el aire ambiente.
- EIONET. (2008). Eionet: European topic centre on land use and spatial information. URL: <http://terrestrial.eionet.europa.eu/CLC2000>.
- EMEP (2008). Monitoring and evaluation of long-range transmission of air pollutant in Europe. URL: <http://www.emep.int>.
- ENVIRON. (2006). *Comprehensive air quality model with extensions (CAMx)*. User's Guide. Environ International Corporation, 415-899-0700.
- GRELL, G., DUDHIA, J. and STAUFFER, D. (1995). *Description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5)*, Technical Report NCAR/TN-398+STR, National Center of Atmospheric Research (NCAR), Boulder (Co), USA.
- INE (1990-2005). *Inventario Nacional de Emisiones*. Edita: Ministerio de Medio Ambiente. España.
- MANTILLA, E., CASTELL, N., SALVADOR, R. (2006). "Utilización de modelos CTM para la estimación del impacto fotoquímico debido a nuevas actividades industriales. Metodología". En: Cuadrat Prats, J.M.; Saz Sánchez, M.A.; Vicente Serrano, S.M.; Lanjeri, S.; De Luis Arrillaga, M. y González-Hidalgo, J.C. (Eds): *Clima, Sociedad y Medio Ambiente*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología AEC, Serie A, nº5, pp. 799-806.
- NILU (2008). Red EMEP description. URL: <http://www.nilu.org>
- SALVADOR, R., MANTILLA, E., CASTELL, N., STEIN, A. F., HERNÁNDEZ, L., MILLÁN, M. (2006). "Analysis of meteorological conditions during photochemical episodes over south-west of the Iberian Peninsula". *6th Annual Meeting of the EMS / 6th ECAC*.