

ALGUNOS ASPECTOS DE LA DINÁMICA DEL OZONO TROPOSFÉRICO EN LA VERTIENTE MEDITERRÁNEA

Núria CASTELL BALAGUER y Enrique MANTILLA IGLESIAS

Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo, CEAM. Parque Tecnológico de Paterna. Charles R. Darwin, 14. 46980 Paterna. Valencia. nuria@ceam.es enrique@ceam.es

RESUMEN

Los niveles de ozono registrados en un punto, dependen de los procesos meteorológicos de transporte y químicos. Los procesos meteorológicos locales-regionales en toda la cuenca mediterránea juegan un papel fundamental en ambos aspectos: constituyen el vehículo de transporte de dichas especies, a la vez que de sus precursores. El desarrollo de intensas circulaciones mesoescalares, favorecidas por las características orográficas del terreno, dan lugar a procesos significativos de recirculación de contaminantes, inyección de los mismos desde la superficie a niveles superiores de la troposfera, la formación de estratos de reserva en altura, etc. En la presente ponencia se revisan algunos de estos comportamientos a través de los registros de algunas estaciones de la red de calidad del aire de la Comunidad Valenciana, donde se pone de manifiesto cómo las circulaciones y procesos mesoescalares condicionan drásticamente las medidas y cómo la interpretación de estas ha de tener en cuenta necesariamente estos aspectos.

Palabras clave: contaminación atmosférica, ozono troposférico, circulación de mesoescala.

ABSTRACT

The ozone levels measured at a site strongly depend on meteorological processes of transport-diffusion and chemical transformations. The meteorological processes on the local to regional scales within the whole Mediterranean basin play a leading role in both aspects: they are the transport vehicle of such oxidant species as well as their precursors. The development of intense mesoscale cycles, enhanced by orographic features, produces significant processes of pollutant recirculation, injection of emissions from the surface to the upper levels of the troposphere, formation of reservoir levels, etc. In the present paper some of these behaviors are reviewed using the records provided by air quality network stations in the Valencian Community, Spain. These show how drastically mesoscale processes condition the inmission values registered and how essential it is, to take these processes into account when interpreting the data.

Key words: atmospheric pollution, tropospheric ozone, mesoscale processes.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica por ozono y otros compuestos fotooxidantes está planteando nuevos retos tanto para la comunidad científica como para los responsables de la gestión medioambiental.

El ozono troposférico está considerado como uno de los contaminantes más importantes en la Unión Europea (SOLOMON, *et al.*, 2000), y estudios recientes apuntan a incrementos globales

de los niveles de ozono entre un 1 y 2 % anual, y aparentemente este crecimiento continúa en la actualidad (CHAIMENIDES, 1994). Este aumento de los niveles de ozono se debe al incremento en el número de emisiones de origen antropogénico, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles, procedentes de áreas industriales y de fuentes móviles.

El efecto perjudicial del ozono tanto sobre la salud humana como en los ecosistemas, hace necesario el desarrollo de estrategias de control de la calidad del aire enfocadas a la prevención, reducción e información a la población.

De una forma muy resumida, podemos enumerar las razones por las que el ozono es perjudicial en los siguientes puntos:

- El ozono afecta a los tejidos de algunas plantas sensibles, por lo que produce daño en cultivos agrícolas y en los bosques (MILLER *et al.*, 1994), la magnitud de los cuales puede llegar a ser muy importante.
- El ozono afecta al aparato respiratorio, siendo un factor de riesgo para los grupos de población más sensibles (niños, ancianos, enfermos coronarios, mujeres embarazadas, etc.)
- El ozono es un gas invernadero, y se suma, por tanto, al efecto que estos gases tienen respecto al calentamiento global.

Morfológicamente, la cuenca mediterránea occidental (de la que forma parte el presente trabajo) se caracteriza por una distribución de barreras montañosas próximas a la línea costera, y suelos secos que se calientan eficazmente, lo que unido a la alta insolación, favorece el desarrollo de sistemas mesoescalares, brisas de mar y de montaña que, aprovechando los pasos naturales, pueden fusionarse para formar sistemas circulatorios de escala superior.

Aunque se trata de una región bien ventilada, a diferencia de las regiones nórdicas, barridas frecuentemente por los grandes sistemas de presión en su desplazamiento *sin retorno*, las costas mediterráneas están presididas por sistemas mesoescalares que dan lugar a procesos recirculatorios.

La característica diferencial del ozono, respecto otros contaminantes, es que se trata de un contaminante secundario, producido a partir de la transformación de especies emitidas directamente, bajo la acción de la radiación solar. Es necesario por ello tener en cuenta para la interpretación de los niveles registrados en un punto, tanto el aporte externo, debido al transporte a larga distancia y/o procesos de recirculación regionales, como a la generación (formación/destrucción) local a partir de la transformación de precursores emitidos en las cercanías, así como de precursores transportados mediante los procesos anteriores. Los registros meteorológicos y de contaminación en una red de calidad ambiental reflejan la combinación de tales procesos superpuestos, pero en ocasiones resulta compleja su identificación y discriminación, lo que supone un problema a la hora de la interpretación y explotación de las medidas.

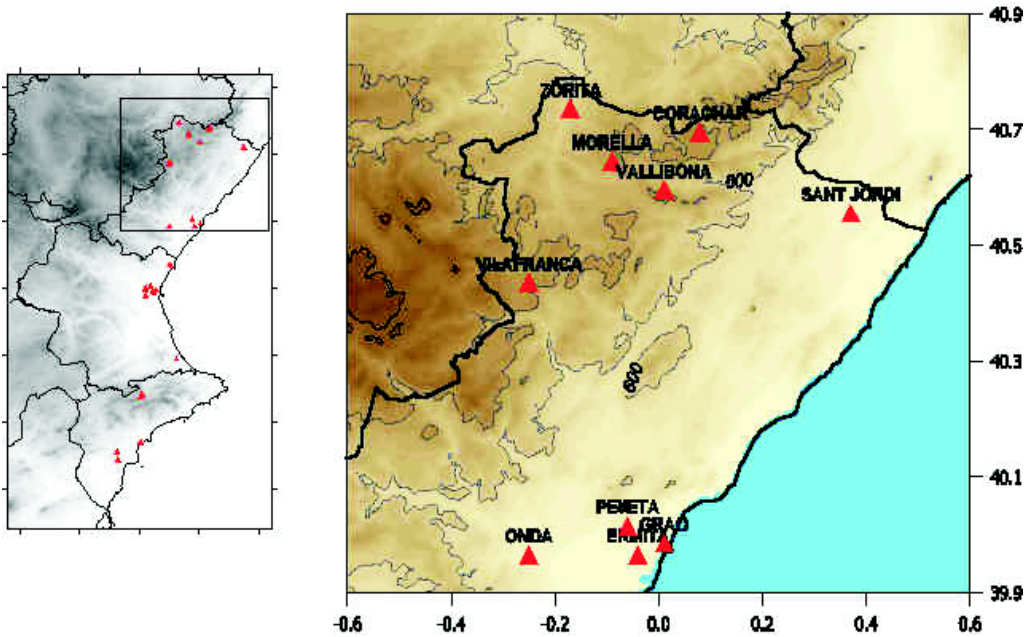


Figura 1: Ubicación de las estaciones de la RAVCA utilizadas en el trabajo.

2. DATOS DE PARTIDA

Para el presente estudio se han utilizado las series de datos recogidas por la Red de Vigilancia de la Calidad del Aire de la Comunidad Valenciana (en adelante RAVCA), concretamente se han empleado las series correspondientes a las cabinas situadas más al norte de la Comunidad (figura 1) por ser el área más cubierta espacialmente.

Se han analizado los datos correspondientes a los años 1997-2001.

El modelo de sensor de ozono utilizado en la totalidad de las estaciones de la RAVCA es el DASIBI 1008-RS. Las medidas se realizan en continuo, de acuerdo a la tecnología estándar de absorción ultravioleta, que sigue los criterios establecidos por la U.S Environmental Protection Agency (U.S. EPA) y por la ISO 13964 (1998). La precisión del aparato es de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las mediciones son almacenadas por el sistema de adquisición de datos según promedios quinceminutales, a los que se exige un cubrimiento mínimo de medidas válidas, siendo esta la mayor resolución temporal a la que se puede acceder. Estos datos son validados semanalmente, de forma que se garantice su calidad. A partir de estos promedios se calculan los restantes estadísticos de interés (medias horarias, diarias, octorarias, percentiles, etc.) de acuerdo a las diferentes necesidades.

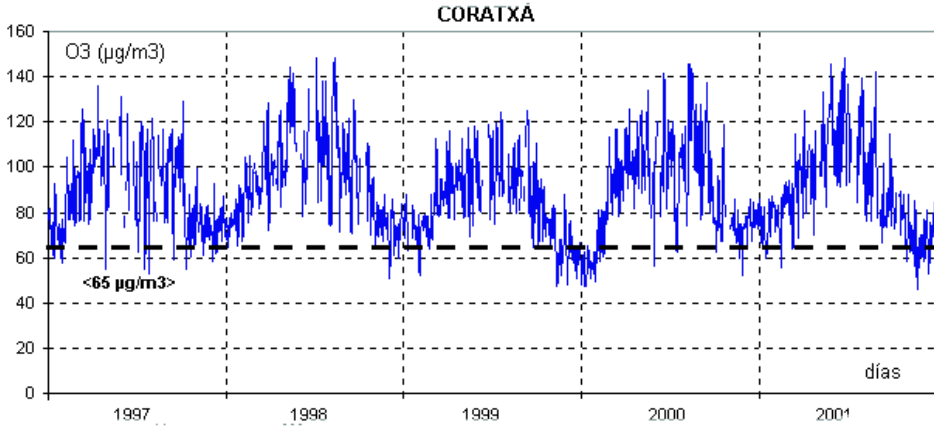


Figura 2: Promedios diarios de concentración de ozono en la estación de Coratxà

3. DESARROLLO Y RESULTADOS

3.1. Episodios de alta concentración de ozono

En la figura 2 se muestra la evolución anual de los promedios diarios de concentraciones de ozono en la estación rural de Coratxà, situada a unos 40 Km. de la costa mediterránea y a más de 80 km de la ciudad más cercana; se observa como el umbral marcado por la Comunidad Europea en la directiva 92/72/CEE (esta directiva ha sido revisada por la directiva 2002/3/CEE) para daños a la vegetación ($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 h) se supera sistemáticamente durante más de 6 meses al año. Por otro lado, el umbral de protección a la salud humana ($110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 8 h) se supera puntualmente al menos durante cuatro meses al año, y el umbral de información a la población ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se supera esporádicamente durante los meses de Abril a Agosto, siendo el porcentaje de superación inferior al 1% (MANTILLA, 2002). Esta situación de concentraciones de ozono *crónicas* es diferente a la situación en Europa central y norte, donde los episodios de concentraciones elevadas son más puntuales. Como ejemplo de un episodio de superación del umbral de información a la población se explica el episodio del 28 de Julio de 2001, en el que se superó el umbral en tres estaciones de la RAVCA.

3.1.1 Episodio del 28 de Julio de 2001

Se produce la superación del umbral de información a la población en tres de las estaciones de la RAVCA: Sant Jordi, Penyeta y Onda, por este mismo orden. La superación en Sant Jordi se produce entre las 13 y las 15 horas UTC, en Penyeta entre las 17 y las 18 horas UTC y en Onda entre las 18 y las 19 horas UTC.

Las condiciones meteorológicas durante la jornada del 28 de Julio estuvieron presididas por un débil gradiente de presiones sobre la Península Ibérica, acompañado por una dorsal en altura,

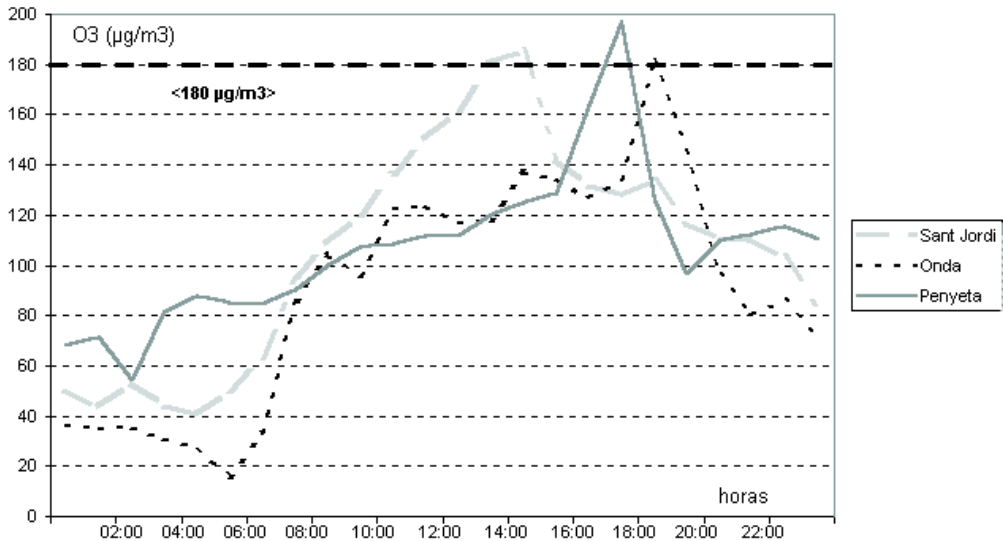


Figura 3: Evolución de la concentración de ozono en las estaciones de Sant Jordi, Penyeta y Onda para el 28/07/2001

sobre la vertiente Mediterránea, que aportó condiciones atmosféricas de marcada estabilidad a esta región (figuras no incluidas). Como consecuencia del elevado calentamiento solar, predominaron en los niveles inferiores ciclos de brisa bien definidos. En las capas altas de la atmósfera, las altas presiones establecieron las condiciones de estabilidad, inhibiendo la mezcla vertical.

La evolución de los niveles de ozono estuvo determinada por los procesos recirculatorios, que desde días atrás estuvieron protagonizando la dinámica atmosférica de esta región, contribuyendo a la 'recarga' de los niveles inferiores de la troposfera. Así pues, la persistencia de los procesos recirculatorios asociados a las brisas, el mantenimiento de altas temperaturas y la alta insolación posibilitaron el incremento de los niveles de ozono. Un análisis más particularizado de cada una de las estaciones:

-*Sant Jordi*: Parte de una concentración nocturna en torno a los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y muestra un incremento temprano de la concentración, con una pendiente bastante acusada a partir de las 7 horas UTC. El máximo se sitúa alrededor del mediodía solar (13-14 UTC), por lo que la producción fotoquímica local es un factor importante.

-*Penyeta*: En el ciclo diario aparece un mínimo muy marcado sobre las 2 h UTC, y aunque parte de una concentración nocturna más elevada que Sant Jordi, la pendiente incremental no es tan brusca, por lo que las concentraciones son más bajas durante la mañana. No aparece ningún máximo local sobre las 7-8 horas (coincidiendo con la rotura de la capa de inversión), por lo que no se piensa en

un aporte vertical. Durante el intervalo de 13 a 14 horas UTC se produce un incremento brusco de los niveles, descendiendo a la hora posterior en más de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

-Onda: Parte de una concentración similar a la de Sant Jodi, pero sobre las 7-8 horas UTC se produce un máximo local, debida a un aporte vertical. La concentración va aumentando paulatinamente, y el máximo se produce a las 18 horas UTC, como consecuencia del transporte horizontal de masa rica en ozono.

3.2. Ciclos diarios

El entorno en el que se encuentra un punto de medida condiciona los procesos meteorológicos a los que se encuentra sometida, y variará sustancialmente el patrón de contaminación que registre a lo largo del tiempo. En la figura 4 se muestra los promedios de evolución diaria por meses, a lo largo de todo el año 2001, de las concentraciones de ozono en tres cabinas. La denominada como Ermita se encuentra situada en la llanura costera, a menos de 1 Km. del mar. Los registros de Onda se corresponden a una cabina situada a unos 40 Km. de la costa, situada en el curso bajo del Valle Mijares, en un entorno con varias industrias. La cabina de Vilafranca se encuentra a una altura de unos 1000 m y esta ubicada en la cuenca de un amplio valle, próxima a una carretera con escaso tráfico. La estación de Coratxà se encuentra entorno a los 1000 m de altura y a una distancia de más de 80 Km. de la costa, en un entorno totalmente rural.

El comportamiento de los registros de ozono en dichas cabinas puede considerarse representativo de la variabilidad en los ciclos de ozono observados a medida que nos alejamos de la costa (costera, 40 Km., 80 Km.) y de los diferentes tipos de emplazamientos. Se observa como en la estación situada en la llanura costera presenta un claro ciclo diurno en todos los meses del año, aunque la amplitud de la onda es considerablemente mayor en los meses centrales (Abril-Octubre) que en los extremos, como consecuencia de un mayor grado de insolación. Sin embargo, el máximo de concentración no se registra en la estación estival, si no en primavera - otoño. Una posible explicación, es que durante los meses de primavera, al aumentar la insolación, se producen circulaciones en superficie durante toda el día (brisas de mar y de montaña), pero estas circulaciones no tienen energía suficiente para desarrollar circulaciones de retorno en altura bien definidas. De esta forma, las capas superficiales se van envejeciendo sin desplazarse considerablemente de su posición, sumándose a las emisiones frescas los productos ya transformados. A medida que entra la estación estival, el mayor desarrollo de las células de brisa costera, combinadas con las circulaciones de montaña, generan flujos cíclicos, con inyecciones en altura y retornos bien desarrollados. El resultado es una mayor limpieza de los niveles inferiores, que son eliminados, en parte, hacia estratos superiores.

En las estaciones de altura, durante los meses invernales la concentración permanece prácticamente constante durante todo el día, mientras que en los estivales se registra una onda diaria, aunque de menor intensidad que en las estaciones costeras. Los máximos si se observan en los meses estivales, ya que el efecto de carga de los estratos superiores se refleja en las concentraciones de ozono registradas a cierta altura sobre el nivel del mar. En cuanto al mínimo de concentración de ozono, en la estación de montaña ocurre en la mañana, coincidiendo con el periodo en la que otras estaciones muestran un crecimiento. Esto se debe al proceso de fumigación, conducido por

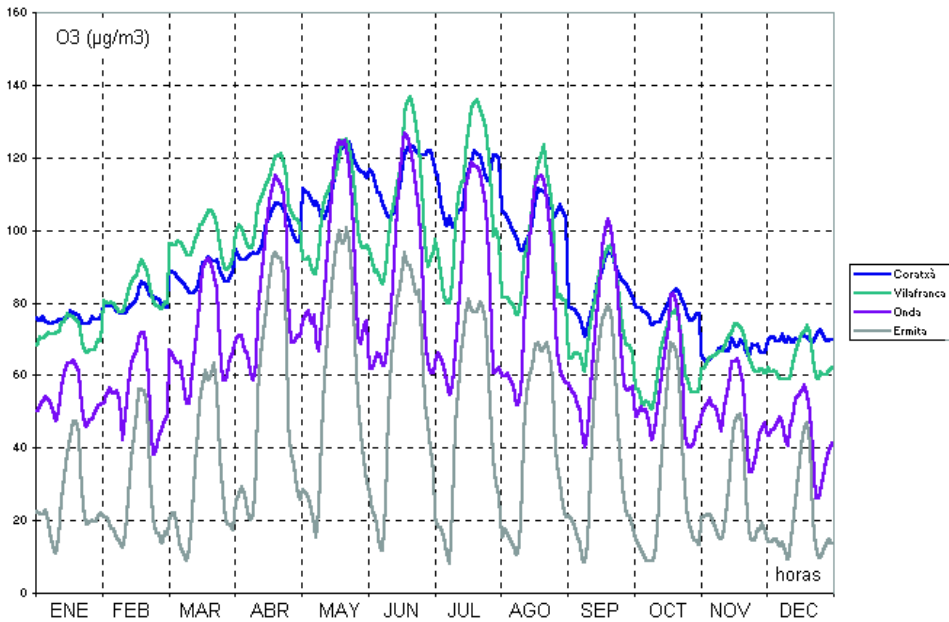


Figura 4: Promedios de evolución diaria por meses para el año 2001 en las estaciones de Ermita, Onda, Vilafranca y Coratxà

un incremento de la insolación, con el resultado del incremento de la mezcla por convección, y los vientos hacia arriba. Para una estación en contacto con los estratos de reserva, cualquiera de los procesos anteriores se traduce en una disminución del ozono.

En cuanto a las estaciones de valle, Millán (2000) realiza una distinción entre aquellas estaciones ubicadas en la región de producción de ozono y las situadas en la región limitante de NO_x. En los promedios de evolución diaria (figura 4) puede observarse el siguiente comportamiento:

(1) Estaciones de valle ubicadas dentro de la región de producción de ozono (Onda): muestran un ciclo de ozono marcado con un crecimiento matutino, debido a la fumigación de ozono viejo procedente de los estratos de reserva, un segundo crecimiento, y un máximo diurno, debido a la producción local.

(2) Estaciones de valle en la región limitante de NO_x (Vilafranca): durante el día forman parte del túnel que trae contaminantes desde la costa, y durante la noche se encuentran dentro de un flujo pobre en ozono. Muestran un ciclo marcado, con un crecimiento matutino debido a la fumigación de ozono desde los estratos de reserva, y un segundo crecimiento cuando llega la brisa con ozono fresco.

3.3 Variación interanual

A continuación se enumeran algunos de los aspectos más relevantes en el comportamiento de los registros (ver figuras 2 y 4), y que refuerzan algunos de los argumentos expuestos anteriormente:

- Se registran valores más elevados cuanto más alto está el emplazamiento, y por tanto más en contacto se encuentra con los estratos atmosféricos superiores no perturbados.
- En las estaciones costeras, la evolución mensual de los niveles de ozono muestra un incremento en el periodo primaveral y otoñal, siendo las concentraciones máximas en estos meses y no en los meses veraniegos.
- Las estaciones de montaña presentan valores prácticamente constantes durante los meses de invierno y un ciclo diario en los meses centrales. El máximo de concentración de ozono se sucede durante los meses de verano.
- La diferencia entre concentración máxima y mínima es más acusada en las estaciones próximas a la costa, debido los procesos de eliminación del ozono por reacción con compuestos presentes en la masa aérea.
- Se supera el umbral de daños a la vegetación ($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 h) durante buena parte del año, especialmente en los meses centrales, así como el umbral de protección a la salud ($110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 8 h).

4. CONCLUSIONES

El análisis de los episodios sugiere que los procesos mesoescalares: recirculación, formación de estratos de reserva, escasa ventilación y envejecimiento de la masa de aire, etc. juegan un papel fundamental en las concentraciones de ozono registradas en la Red de Calidad Ambiental. Por ello resulta de vital importancia el estudio de las circulaciones locales y regionales y su relación con la dinámica de contaminantes, para la predicción de situaciones de alta contaminación en la cuenca mediterránea.

Las condiciones sinópticas en las que se registran los episodios de alta concentración son favorables al desarrollo de este tipo de circulaciones, observándose la repetición sistemática de un patrón en el que los mapas de presión en superficie a medio día presentan una situación anticiclónica de estabilidad atmosférica, con el centro de altas presiones situado mayoritariamente sobre el Atlántico, aunque también puede aparecer en las Islas Británicas, en Europa o en el Mediterráneo. También es frecuente la formación de una baja térmica relativa en el interior de la Península, consecuencia del intenso calentamiento. En los mapas de altura se observa, generalmente, una dorsal de aire cálido proveniente de África, lo que inhibe la mezcla vertical de la masa aérea.

En lo referente a las concentraciones de ozono registradas, parece observarse el siguiente comportamiento repetitivo:

- La ocurrencia de valores más altos en las zonas del interior que en el litoral
- La evolución mensual de los niveles de ozono, con un incremento en el periodo primaveral, registrándose un máximo relativo en el mes de Mayo

Tal y como corresponde a las circulaciones atmosféricas de mesoescala.

En cuanto a las superaciones de los umbrales legales, éstas muestran un mayor porcentaje hacia el interior de la Comunidad, relacionadas con el transporte de la masa aérea contaminada, a través de los pasos naturales, desde las áreas litorales, donde se encuentra la mayor concentración de focos emisores antropogénicos, así como en las zonas del litoral próximas a zonas de emisión de precursores.

El carácter fuertemente no lineal del comportamiento de las concentraciones de ozono, dependientes de una gran diversidad de factores, que concurren simultáneamente, interaccionando a diferentes escalas, no permite identificar una causa bien definida que justifique la evolución temporal de las concentraciones de ozono (CASTELL, 2001). Un verano seco y en general soleado, con largos periodos de persistencia anticiclónica, parecen una explicación excesivamente simplista.

5. AGRADECIMIENTOS

La Fundación CEAM esta financiada por la Conselleria de Medio Ambiente de la Generalitat Valenciana y por la Fundación Bancaixa.

6. REFERENCIAS

CASTELL, N. (2001): Estudio de los invariantes de la dinámica del ozono mediante técnicas del análisis no lineal. En PÉREZ CUEVA, A.J, LÓPEZ BAEZA, E. y TAMAYO CARMONA, J. (Eds.): *El tiempo del clima*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC, serie A, nº 2), pp. 65-73.

CHAIMENIDES, W.L., KARIBHATLA, P.S., YIENGER, J. y LEVY, H. (1994): Growth of continental-scale metro-agro-plexes, regional ozone pollution, and world food production. *Science*, 264, pp. 74-77.

MANTILLA, E., CASTELL, N., DIÉGUEZ, J.J. y PALAU, J.L. (2000): *Previozono 2001, programa especial de vigilancia del ozono troposférico en la Comunidad Valenciana. Informe Final*. Fundación Ceam. Vol 1. Puede consultarse en: <http://www.cma.gva.es/>

MILLÁN M., MANTILLA, E., SALVADOR, R., CARRATALÁ, A. SANZ, M.J, ALONSO, L., GANGOITI, G. y NAVAZO, M. (2000): *Ozone cycles in the western mediterranean basin: interpretation of monitoring data in complex coastal terrain*. American Meteorological Society, pp. 487-508.

MILLER, P.R., DE LOURDES DE BAUER, Q. y HERNANDEZ, T. (1994): Comparison of ozone exposure characteristics in forested regions near México City and Los Angeles. *Atmospheric Environment*, 28, pp. 141-148.

SOLOMON, P., COWLING, E., HIDY, G. y FURINESS, C. (2000): Comparison of scientific findings from major ozone field studies in North America and Europe. *Atmospheric Environment*, 34, pp. 1885-1920.