

La contaminación atmosférica por ozono en la cuenca mediterránea

Es una de las áreas críticas para la formación de fotooxidantes que pueden ser dañinos para los organismos

Los compuestos orgánicos (C_nH_n , C_nH_{n-1} , etc., piezas básicas de los seres vivos) se oxidan con cierta facilidad, por lo que un oxidante fuerte como el ozono puede tener un efecto dañino sobre los organismos vivos cuando se encuentra en contacto directo con ellos. De este hecho, por ejemplo, se deriva la utilización industrial del ozono en los procesos de esterilización y depuración de ambientes para evitar la proliferación de microorganismos (bacterias...).

La popularidad de este compuesto actualmente, por diversas razones, requiere la aclaración de un hecho importante: según su localización con respecto a la biosfera (parte de la atmósfera donde se desarrolla la vida) y debido a las propiedades mencionadas anteriormente, el ozono puede ser **beneficioso** (indirectamente en la alta atmósfera) o **perigroso** (cuando en concentraciones suficientes se encuentra en contacto directo con los seres vivos en la baja troposfera).

El ozono troposférico en la cuenca mediterránea. La Comunidad Valenciana

A nivel europeo, una de las áreas más críticas para la formación de **fotooxidantes** (el más importante es el **ozono**) es la cuenca mediterránea. Esta región tiene un mar interior, profundo, que está rodeada de altas montañas. Durante el verano el mar permanece más frío que las tierras circundantes y se producen brisas de mar y de ladera que se combinan a lo largo del día. Generalmente, la penetración de estas brisas está ligada a la estructura de las montañas costeras, pero, por término medio, pueden penetrar hasta unos 60 ó 100 km tierra adentro. Finalmente, el flujo de retorno de las brisas tiene lugar entre 1,5 y 2,5 km de altura, también dependiente de la estructura de las cadenas montañosas, volviendo el aire hacia el mar.

En estos procesos, el aire y las emisiones de la costa circulan, durante el día, a lo largo de una superficie caliente, sobre la que produce una mezcla muy activa, en su camino hacia las cumbres de las montañas costeras (fig. 1)

El ozono no es más que un gas incoloro altamente reactivo compuesto por átomos de oxígeno. Esta alta reactividad le viene dada por su naturaleza triatómica que le hace altamente inestable y le confiere la capacidad de ceder un átomo de oxígeno muy fácilmente ("oxidar a otros compuestos"). Estas propiedades le convierten en uno de los oxidantes más fuertes que se conocen.

María José Sanz. Dra. CC. Biológicas. Fundación CEAM. Valencia.

(esto ocurre en presencia de fuerte radiación solar), y retornan hacia el mar, a unos 2 km de altura, sobre el que se estratifican y hunden, parcialmente, para formar una especie de pastel de milhojas con contaminantes ya envejecidos (**fotooxidantes de reserva**). Mientras tan-

to, los estratos más bajos, que ya estaban sobre el mar, son arrastrados hacia tierra con la brisa de mar y reaccionan con los contaminantes recién emitidos en la costa.

Como consecuencia de estos mecanismos, las brisas de ladera y de mar arrastran los estratos más bajos hacia tierra y reponen en altura, recargando, los estratos que la brisa de mar consume por abajo. Durante el verano, estos ciclos se repiten todos los días y han sido documentados por primera vez como resultado de tres proyectos de la UE. El período de retorno de la masa de aire típico, establecido por medio de trazadores, es de dos a tres días en verano. Esto es, los contaminantes emitidos un día en la costa retornan como si viniesen del mar dos o tres días más tarde.

También se ha establecido que los estratos con aire rico en ozono inyectados en altura por las laderas, como resultado de los cierres progresivos de las celdas de brisa, pueden viajar fácilmente hasta el centro de la cuenca mediterránea occidental en menos de un día, y que las velocidades de hundimiento de los es-

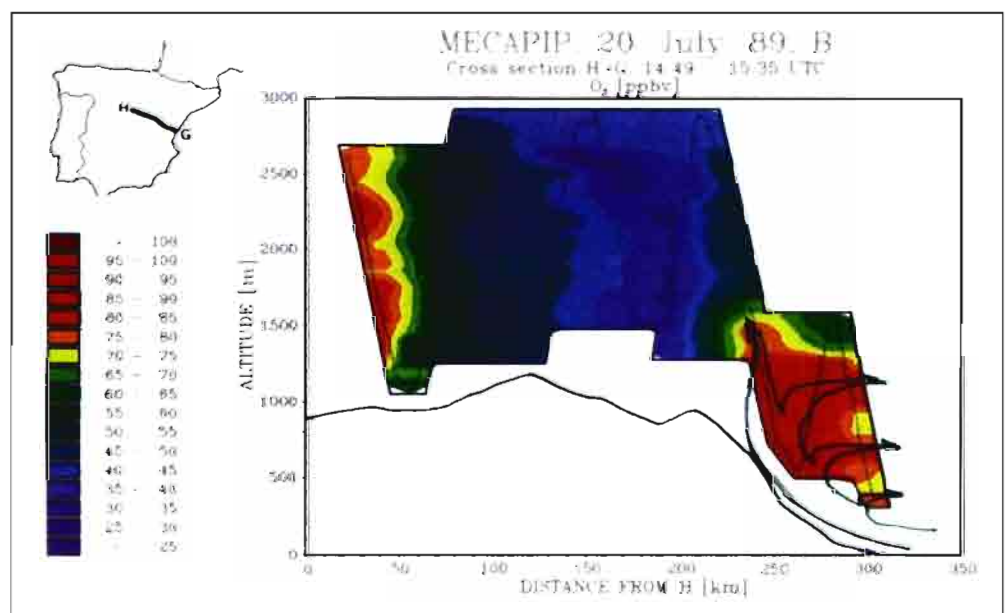


Figura 1. Ejemplo de la penetración de las brisas hacia el interior por el valle del Mijares. Los colores rojos indican concentraciones altas de ozono que, como puede apreciarse, penetran desde la costa junto con las brisas, y a mediodía (hora en la que tomaron estas medidas) ya penetran del orden de 150 km hacia el interior por el valle. Valbona está a 80 km de la costa en este mismo valle y Cirat a 40 km. Sobre la vertical de Madrid también se observan elevadas concentraciones de ozono. Se puede observar entre la costa y el centro de la Península zonas con aire limpio (en azul). (Modificado de Millán et al. 1993).

tratos sobre el mar varían entre 4 y 15 cm por segundo. Esto es, aproximadamente un kilómetro durante el período efectivo del día solar. Estos resultados coinciden con lo documentado con los trazadores¹¹.

El proceso es algo más complejo, puesto que los contaminantes estratificados migran a lo largo de la costa durante la noche y, al día siguiente, pueden encontrarse varias decenas de kilómetros viento abajo de donde fueron inyectados en altura. Así que se desplazan siguiendo una especie de espiral a lo largo de la costa.

Se estima que, en este proceso, los precursores emitidos en el complejo industrial de Fos Berre, cerca de Marsella, en el sur de Francia, pueden viajar a lo largo de la costa española, arrastrando a su vez las emisiones producidas en ella y produciendo ozono hasta que ventean por Gibraltar hacia las Islas Canarias.

El resultado final de estos procesos es que toda la cuenca mediterránea puede considerarse, a estos efectos, como un gran reactor fotoquímico. Esto es, una especie de gran recipiente donde los contaminantes atmosféricos, hasta una profundidad de 2 a 3 km, reaccionan entre sí, con un ciclo diario, desde los bordes hacia el centro². El influjo de aire del Atlántico más limpio se produce a la altura del golfo de León y la salida por Gibraltar. Ambas son las vías de renovación de la masa de aire en la cuenca occidental del Mediterráneo. Esta escasa ventilación en la cuenca hace que la residencia de una masa de aire sea mayor que en el norte y centro de Europa, lo que conlleva un mayor calentamiento (mejor clima) y una mayor carga de contaminantes para la mismas tasas de emisión (si estas fuesen iguales)³. Procesos similares se han documentado también a lo largo de la costa italiana con flujo neto hacia el norte de África.

Legislación vigente sobre el ozono en la Comunidad Europea

Para el ozono existe una legislación vigente a nivel nacional, traspuesta de la legislación comunitaria, que tiene como objetivo el conocimiento de los niveles de contaminación por ozono en Europa, para lo que se reglamenta la localización de las estaciones de medida (con criterios de representatividad climatológica y geográfica donde se produzcan las máximas concentraciones), se unifican los métodos de medida y se establece un protocolo para el intercambio de

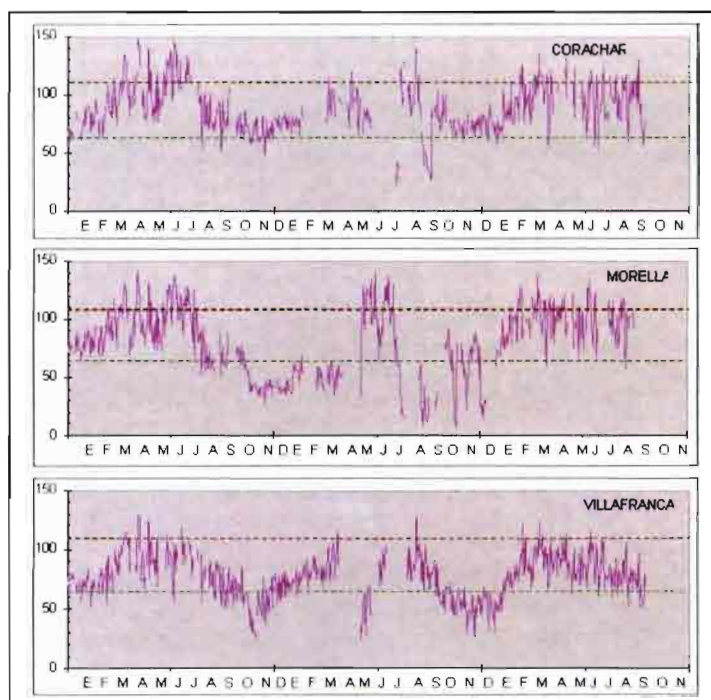


Figura 2. Medias de la concentración de ozono de 24 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de las estaciones de Morella, Villafranca y Corachar, durante los años 1995, 1996 y 1997. La línea verde de puntos indica el umbral de protección de la vegetación ($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

datos entre los Estados miembros.

La Directiva Europea es la 92/72, que ha sido traspuesta en la legislación española como el Real Decreto 1494/95 (ver **cuadro I**).

El umbral de protección a la vegetación de $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio de 24 horas es superado ampliamente en muchos puntos de la Comunidad Valenciana todos los años (véase la información disponible de la Red de Calidad del Aire de la Comunidad Valenciana, Consellería de Medio Ambiente). Estas superaciones son mayores en puntos de carácter rural, es decir, alejados de los núcleos urbanos e industriales. Hecho diferencial de los contaminantes de tipo secundario como el ozono respecto a los primarios, como el dióxido de azufre.

Los valores de ozono registrados por algunas estaciones de la Red de Calidad Ambiental de la Comunidad Valenciana, especialmente en estaciones de tipo "rural" (fuera de las ciudades), sobrepasan los valores de la Directiva Europea de protección a la Vegetación de 32,5 ppb ($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$), valor medio de 24 horas durante los meses de primavera, verano y parte del otoño (**figura 2**), medias diarias en algunas estaciones rurales de la Red de Calidad del Aire de la Comunidad Valenciana).

Es interesante destacar que, aunque en general en todas las estaciones que se han estudiado sobrepasan los valores de protección a la vegetación, se puede observar varios tipos de ciclo diario según la localización de las estaciones:

- En la costa, los ciclos son claramente de

alternancia día/noche, con un máximo a mediodía y valores más bajos por la noche. Ejemplos, Castellón Sur (**figura 3**). A este tipo de situación corresponde la localización del campo experimental de Benifaió (Valencia), donde se están realizando las experiencias relacionadas con la sensibilidad de los cultivos al ozono por parte del CEAM.

- En las estaciones situadas en localizaciones relativamente altas (más de 1.000 m de altura), fuera de los valles, no se produce un ciclo diario marcado. Las concentraciones se mantienen constantes durante todo el día o con un ciclo muy poco marcado. Y van aumentando paulatinamente hacia el verano (**figura 3**). Ejemplo, Morella (Castellón), donde no se aprecian ciclos diarios marcados, aunque las concentraciones son elevadas durante todo el día.

- Existen algunas variaciones de estos ciclos, y se pueden observar en la cabecera de los valles, y

en sus elevaciones medias, donde se ven valores nocturnos elevados y un ciclo diario (aumento) que se superpone a estos. Ejemplo, Villafranca (**figura 3**) y Cirat (**figura 3**), ambas con valores elevados por las noches y que aumentan aún más durante el día.

En resumen, en muchas localizaciones de la Comunidad Valenciana donde la agricultura es importante las concentraciones de ozono medidas superan los valores de protección a la vegetación de $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como media de 24 horas.

La problemática en los hortícolas y la contaminación atmosférica

En los últimos años se han detectado problemas en el cultivo de algunas hortalizas, lo que ha contribuido a la reducción de las superficies de cultivo en más de 10.000 ha en el cuatrienio 1988/92 en la Comunidad Valenciana. En un principio, muchos de estos problemas se han achacado a la aparición de nuevos y más agresivos problemas virales. Además, parece constatar que su agresividad y manifestación parece estar asociada a la proximidad al mar, amortiguándose o desapareciendo en las áreas del interior de la Comunidad Valenciana.

Se ha encontrado un factor común con capacidad de desequilibrio a nivel global, la presencia de niveles de fotooxidantes (ozono) desde los meses de abril a septiembre que superan el umbral de protección de la vegetación y, por tanto, pueden considerarse fitotóxicos



Figura 5. Daños visibles debidos a ozono en hojas de diferentes especies hortícolas: a) rábano (clorosis internerviales), b) acelga (moteado clorótico), c) judía (moteado pardo-rojizo internervial). Todos estos síntomas sólo son observables en el haz.

nos continua, aunque puntual, desde mediados de los años ochenta sobre los efectos producidos por fotooxidantes en cultivos. Así pues, la primera referencia de la que tenemos constancia de la existencia de este tipo de daños en Italia es de 1984, que parece coincidir con los primeros indicios de la problemática en nuestro país a principios de los ochenta. Los estudios más intensivos se han llevado a cabo en el valle del Po y Tuscany, donde se ha establecido una buena correlación entre los daños aparecidos en los cultivos y las concentraciones reales detectadas. Existen, así mismo, trabajos puntuales en las áreas de Roma y Boloña.

Frecuentemente, en los citados estudios, en las series de datos de ozono pertenecientes a áreas rurales, se ha observado que se sobrepasan los estándares de fitotoxicidad. Por ello, no es de extrañar la aparición de daños en los cultivos, aunque la variabilidad observada es grande. Algunos aspectos de los datos obtenidos por estos equipos italianos merecen destacarse: en primer lu-

gar, los efectos producidos por el ozono son más agudos en áreas rurales que en áreas urbanas o sus áreas de influencia y, en segundo lugar, la respuesta de los mismos cultivos es distinta en diferentes condiciones climáticas. El primero de estos aspectos se explica fácilmente por el exceso de óxidos de nitrógeno en las áreas urbanas y sus alrededores que disminuyen considerablemente la concentración de ozono.

Todas estas evidencias confirman que los fotooxidantes, y especialmente el ozono, se muestran como un problema que afecta a toda la cuenca del Mediterráneo. Coincidiendo su aparición, a finales de la década de los setenta, con la instalación de grandes complejos industriales en la costa mediterránea. Además, algunos de los problemas aparecidos en la agricultura de la zona se han podido relacionar directamente con las elevadas concentraciones de este contaminante, y existe la fuerte sospecha de que algunos problemas fitosanitarios que se han acentuado últimamente pueden estar relacionados también con esta problemática (su comportamiento anómalo).

Algunas experiencias en la Comunidad Valenciana enfocadas a la caracterización de los daños provocados por el ozono en la horticultura

Con objeto de estudiar los efectos del ozono en algunas especies hortícolas que vienen teniendo problemas debidos, parece ser, a la combinación de varios factores, de los cuales el más evidente es la aparición de virosis muy agresivas, se instalaron un total de 9 cámaras

y 4 parcelas ambientales en la Finca "La Peira" en el término municipal de Benifaió. Esta instalación es fruto de la colaboración desde 1996 de la Fundación CEAM y el Servicio de Sanidad y Certificación Vegetal de Silla (SSCV) de la Consejería de Agricultura, Pesca y Alimentación de la Comunidad Valenciana. Las cámaras instaladas en Benifaió son las denominadas NCLAN, estandarizadas por el *National Crop Loss Assessment North American Program* de los Estados Unidos (figuras 4 y 5).

El campo experimental está actualmente en funcionamiento. En él se realizan experiencias con melón (var. Yupi), alcachofa y tomate principalmente. Aunque se están documentando también los daños visibles en muchas especies de hortícolas como son: judía, patata, berenjena, lechuga, rábano, zanahoria, perejil, habas, guisantes, etc., con la colaboración con la UPV (dra. Concha Jordá). Los resultados obtenidos muestran que algunas de las variedades de tomate utilizadas son extremadamente sensibles; que la evolución de ciertas virosis en melón puede ser condicionada por las concentraciones ambientales de ozono; que la alcachofa es un cultivo sensible al ozono, pudiendo afectar la capacidad para el rebrote en años sucesivos; y que pueden observarse daños visibles producidos por ozono en algunas plantas hortícolas en la Comunidad Valenciana.

Las últimas evidencias de los efectos del ozono sobre hortalizas y cereales en Europa, incluyendo alguna información sobre el área mediterránea y especialmente el arco levantino, aparecen en el último informe de la UN-ECE relacionado con las cargas críticas para el ozono, poniendo de manifiesto la existencia de daños en una amplia extensión de la cuenca simultáneamente, tanto en cultivos como en otras especies (incluyendo las arbóreas). ■



Figura 6. Ejemplares de zanahoria crecidos a concentraciones diferentes de ozono, izquierda muy bajas, centro moderadas, derecha altas.

NOTAS

↑ Gases raros que se sueltan para poder seguir la evolución de una masa de aire, generalmente se utilizan chimeneas. En este caso la chimenea de la C.T. de Castellón.

Se trata de un proceso similar al de hervir un líquido en un recipiente. En este caso se trata de aire.

Consecuentemente un mayor desarrollo industrial, aumento del parque móvil, etc., comparable al ya existente en países del norte y centro de Europa, en nuestras latitudes resultará posiblemente en una elevación sustancial de estos contaminantes si no se toman las medidas de control pertinentes. Ello incluye los países del norte de África.