



Congreso Nacional del Medio Ambiente
Cumbre del Desarrollo Sostenible

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Concentraciones de ozono superficial en Andalucía: zonificación.

Autor: Benito A. De la Morena Carretero

Institución: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial
E-mail: morenacb@inta.es; benitohe@hsoft.es

Otros autores: José A. Adame (INTA, Estación Sondeos Atmosféricos El Arenosillo - Área de Investigación e Instrumentación Atmosférica), Juan Contreras (Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía), Antonio Lozano (Empresa de Gestión Medioambiental), Francisca Godoy (Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía), Miguel A. Hernández (INTA, Estación Sondeos Atmosféricos El Arenosillo - Área de Investigación e Instrumentación Atmosférica y Departamento de Física Aplicada. Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Huelva), Bolívar, J.P. (Departamento de Física Aplicada. Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Huelva).



RESUMEN:

En la actualidad la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (CMAJA) dispone de 50 estaciones para la medida de ozono superficial. Con el fin de mejorar la gestión y evaluación de la calidad del aire en cuanto a ozono superficial, en el año 2006 la CMAJA comenzó a realizar una serie de trabajos orientados a realizar una zonificación de ozono en Andalucía. Con la experiencia acumulada en años anteriores, en los que se ha estado analizando diversos aspectos de esta sustancia (evoluciones típicas, análisis de episodios, determinación de las rutas de formación y transporte, etc.) se conoce que las concentraciones de ozono vienen determinadas principalmente por una serie de factores como son los procesos atmosféricos de la baja atmósfera, las emisiones y la orografía; por ello se plantea realizar estudios que aborden cada uno de estos aspectos. Para profundizar en el conocimiento de los procesos atmosféricos en superficie, se realiza un estudio del régimen de viento a nivel andaluz, utilizándose los valores horarios de 72 estaciones meteorológicas pertenecientes a diversos organismos, durante el período 2000-2007. A partir de este análisis se han propuesto posibles rutas de transporte de contaminantes atmosféricos en cada una de las estaciones del año. Las fuentes de emisión fueron analizadas gracias a los mapas de emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV's) y óxidos de nitrógeno (NOx) obtenidos del inventario de emisiones de la CMAJA, correspondiente al año 2005. A los registros horarios de ozono del período 2003-2007, se les ha aplicado un análisis cluster's de K-medias con el objetivo de realizar una agrupación de las estaciones de medida. Este estudio se ha llevado a cabo en tres niveles: agrupación de estaciones por provincias, por áreas geográficas de interés y en todo el territorio. Además se utilizaron otras fuentes de información, como los resultados obtenidos en las campañas realizadas con captadores difusivos en 2001, 2003 y 2006, y la clasificación de las áreas climáticas. A partir de los resultados obtenidos en cada uno de los mencionados estudios se ha propuesto una división de la Comunidad Autónoma en ocho zonas, entre las cuales se pueden mencionar el valle del Guadalquivir, las zonas de sierra ubicadas al norte del valle, la franja costera mediterránea, las cordilleras béticas, o la zona del estrecho de Gibraltar.



1. Introducción.

Es bien conocido que el ozono es un gas que en las capas bajas de la atmósfera genera una serie de problemas medioambientales cuando se encuentra en concentraciones medias y altas, valores por encima de $120 \mu\text{g m}^{-3}$ como media 8h o superiores a $180 \mu\text{g m}^{-3}$ como medias horarias, según la legislación vigente (Real Decreto 1796/2003). Este es un problema global que ha llevado desde hace años a estudiar los niveles, variaciones y comportamiento del ozono superficial en numerosos puntos del planeta (Boian y Kirchhoff, 2005; Darby et al., 2007; Adame et al., 2008; Jenkin, 2008).

Con objeto de minimizar los efectos adversos que puede tener el ozono en el medio ambiente atmosférico, los responsables en política medioambiental aplican una serie de medidas para en una primera etapa conocer y posteriormente controlar los niveles de ozono, es decir realizar una correcta gestión de la calidad del aire referente al ozono superficial.

Una región geográfica puede presentar unas condiciones meteorológicas, orográficas y de emisión de precursores que hagan que las concentraciones de ozono superficial en el interior de dicho territorio no sean homogéneas. Debido a ello será necesario definir dentro de esa unidad geográfica una serie de zonas en las que las concentraciones o bien las variaciones del ozono sean similares, teniendo como objetivo el poder realizar una óptima gestión de cada una de esas zonas.

Se plantea, por tanto, el definir una serie de zonas en las que las concentraciones de ozono en su interior puedan estar sometidas a los mismos procesos atmosféricos, aunque se tengan diferentes niveles de emisión de precursores y distintos niveles de concentración.

Este objetivo es el que ha perseguido en los últimos meses la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (CMAJA), definir en la Comunidad Autónoma andaluza una serie de zonas.

Para ello gracias al Acuerdo Específico que tiene la CMAJA y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) en materia de ozono superficial, desde el año 2004, se ha estado trabajando conjuntamente en una metodología de trabajo, la cual se ha desarrollado para llegar al objetivo propuesto: la definición zonas.

En esta comunicación se presenta de forma resumida, los estudios que se han realizado y que han llevado a la propuesta final de zonificación de ozono en Andalucía.

2. Metodología.

En la actualidad no existe una metodología estándar para abordar este tipo de problema, definir zonas de ozono en un territorio. El primer obstáculo se presenta en el propio concepto de "zona". Una zona puede ser entendida como una unidad que está sometida a los mismos procesos atmosféricos, o en la que hay unos mismos niveles de emisión, o bien que se tengan unas concentraciones de ozono similares o que las variaciones sean iguales, pudiendo estas definiciones ser totalmente válidas.



En el caso que nos ocupa se ha considerado zona como aquella porción del territorio sometida a los mismos procesos atmosféricos y en las que las variaciones de ozono pueden ser similares, pero los niveles de las concentraciones pueden ser distintos.

Partiendo de esta definición y conociendo los procesos que afectan las concentraciones de ozono, se considera necesario hacer un análisis tanto de los niveles como de las variaciones que presenta el ozono en la región de estudio. A continuación será necesario identificar los procesos atmosféricos, siendo necesario para ello estudiar el régimen de viento en superficie. Una vez que se tiene este cuerpo de conocimiento se puede realizar una primera propuesta de zonas.

Esta primera propuesta de zonas se ha comparado con otras fuentes de información, las cuales lleven a una mejora en el conocimiento de los procesos de formación y transporte de las concentraciones de ozono. De esta forma se ha aplicado la técnica cluster a los registros, del periodo 2003-2007, de las 50 estaciones de ozono utilizadas y se han comparado los resultados con la propuesta inicial. Así mismo, también se ha realizado el mismo análisis comparativo con los mapas de emisión de precursores (NO_x y COVNM), los resultados obtenidos de las campañas llevadas a cabo con los captadores difusivos, y las áreas climáticas.

A partir de la propuesta inicial y de los resultados obtenidos con estos trabajos comparativos se ha realizado una propuesta final, que pretende cubrir un doble objetivo, agrupar todos los resultados obtenidos en cada uno de los estudios parciales que se han desarrollado y facilitar la gestión de la calidad del aire con respecto al ozono en Andalucía.

3. Resultados.

3.1. Evolución de las concentraciones de ozono en Andalucía.

En la actualidad en Andalucía se tienen 50 estaciones de ozono pertenecientes a la Red de Vigilancia y Control de la Calidad del Aire. En el mapa de la Fig. 1 se puede observar la distribución geográfica de los puntos de medida.

En el valle del Guadalquivir y costa atlántica se localizan más del 60 % de todas las estaciones, principalmente en la parte baja y media del valle. En la zona alta del valle se tienen estaciones en las ciudades de Córdoba y Jaén, no existiendo en áreas rurales. En Sierra Morena únicamente se tiene la estación de Sierra Norte ubicada en la provincia de Sevilla.

La costa mediterránea está monitorizada con estaciones en la bahía de Algeciras, costa de Málaga, Granada y Almería, dentro de esta franja la mayor concentración de estaciones se tiene en la zona industrial de Algeciras y en la costa de Almería.

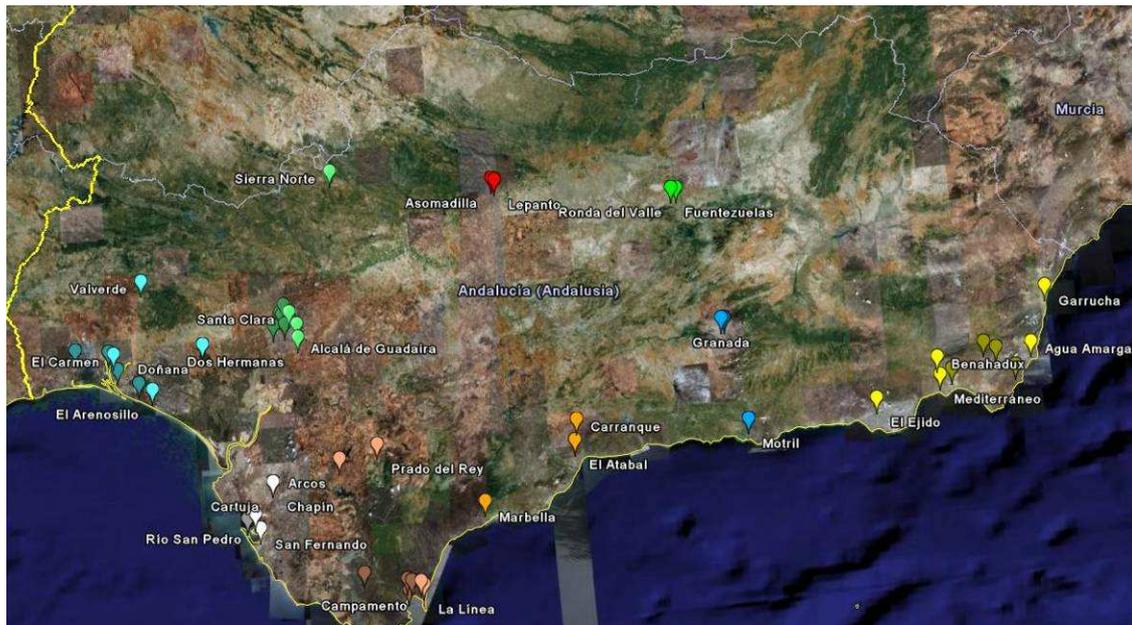


Fig. 1. Red de medición de ozono en Andalucía perteneciente la CMAJA.

Aunque se han realizado estudios más detallados, como por ejemplo la evolución que presenta el ozono en cada provincia o bajo distintos escenarios meteorológicos, se ha querido mostrar de una forma general la evolución que presentan las concentraciones de ozono en Andalucía en aquellas dos áreas geográficas con un mayor número de estaciones de ozono, costa mediterránea y valle del Guadalquivir.

Evolución del ozono en la costa mediterránea.

Como representativa de esta franja costera se han seleccionado por su ubicación geográfica las estaciones de Carteya, Marbella, El Atabal y Motril. Del análisis de la variación que experimentan los valores horarios de ozono en diferentes períodos analizados se ha podido conocer que bajo escenarios meteorológicos dominados por la escala sinóptica el comportamiento del ozono es muy similar, con ciclos diarios muy suaves y concentraciones máximas diarias que apenas alcanzan los de $90 \mu\text{g m}^{-3}$. Un caso de estas características ocurrió los días 14 y 15 de septiembre de 2006 (Fig. 2).

Sin embargo, cuando se tiene un bajo gradiente isobárico, muy probablemente se favorece el desarrollo de procesos de mesoescala y en toda la costa mediterránea se pudieran tener fenómenos de brisa costera. En este caso los registros de ozono deberían estar afectados por las emisiones locales y la orografía, puesto que en las costas mediterráneas de Cádiz, Málaga y Granada se tiene la zona montañosa muy cercana a la costa, con valles que pudieran canalizar el transporte hacia el interior.

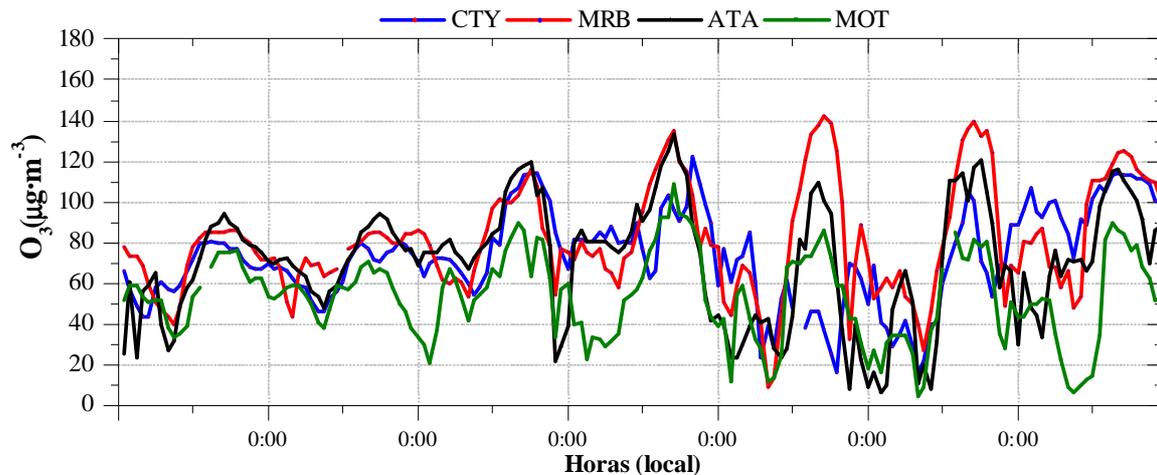


Fig. 2. Evolución del ozono en los emplazamientos de la costa mediterránea durante el período del 14 al 20 de septiembre de 2006.

De los resultados obtenidos con el análisis de la evolución de las concentraciones se propone que las estaciones localizadas en la costa mediterránea se pudieran agrupar en tres zonas. En una primera se ubicarían las estaciones que se encuentran en la bahía de Algeciras, en una segunda las estaciones de Málaga (Marbella, Carranque y El Atabal), la estación de Motril y las estaciones de la costa almeriense ubicadas en la zona sudoeste de la provincia (El Ejido, El Boticario, Mediterráneo, etc.). La última estaría formada por las estaciones ubicadas en la costa nordeste de Almería, como son Garrucha y Campohermoso.

Evolución del ozono en el valle del Guadalquivir.

El valle del Guadalquivir es la zona de Andalucía que presenta mayores problemas de ozono, teniendo como consecuencia numerosas superaciones de los umbrales legales. En este entorno geográfico se ubican las estaciones de ozono de la provincia de Huelva, Sevilla, Córdoba, Jaén y la bahía de Cádiz, a la que se añadiría también la estación de Alcornocales.

Se ha estudiado la evolución que experimentan las concentraciones de ozono de forma simultánea a lo largo del valle. La zona baja del valle estaría representada por las estaciones de la bahía de Cádiz y Huelva, el tramo medio con las estaciones de Sevilla y Córdoba y la zona alta del valle estaría monitorizada con las estaciones de Córdoba y Jaén.

En la Fig. 3 se muestra, a modo de ejemplo, la evolución de las concentraciones de ozono de las estaciones de la provincia de Huelva y de la bahía de Cádiz. En general la variación que experimentan los registros de ozono en esta zona baja del valle del Guadalquivir son similares. Puesto que el aumento de las concentraciones viene definido por una mayor actividad fotoquímica, la cual ocurre cuando se tienen velocidades bajas del viento, temperaturas medias diarias superior a los 20 °C y una dinámica de la baja troposfera dominada por brisas costeras que se generan en el litoral del golfo de Cádiz.

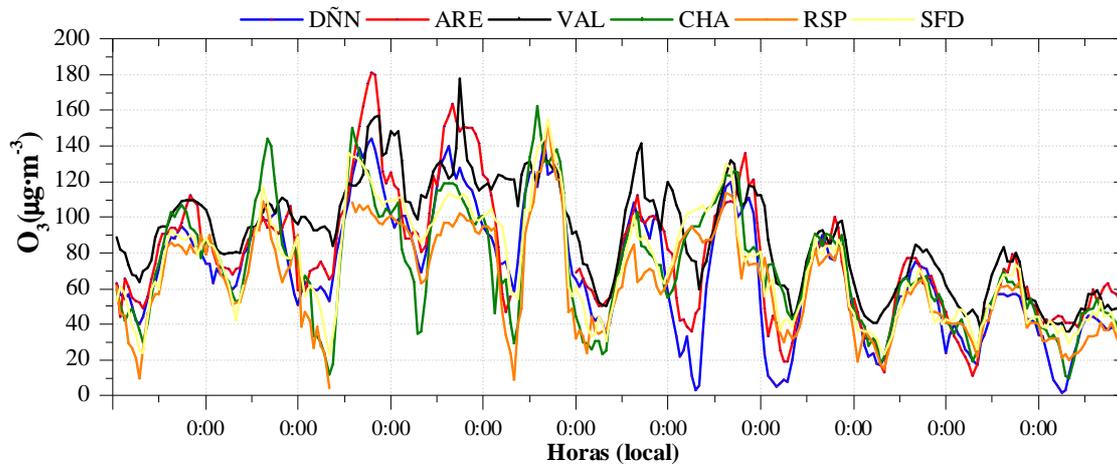


Fig. 3. Evolución del ozono en los emplazamientos de Huelva y la bahía de Cádiz durante el período del 17 al 27 de julio de 2005.

En el período concreto de julio de 2005 que se muestra, se puede observar que se tienen dos días con baja actividad fotoquímica, seguidos de tres días con mayores concentraciones, superiores a los $140 \mu\text{g m}^{-3}$. Aquellas estaciones con un carácter rural o alejadas unos kilómetros de la costa: El Arenosillo, Valverde, Doñana y Chapín son las que presentan las concentraciones más elevadas. En los últimos días de este período las concentraciones de ozono descienden hasta encontrarse máximos diarios que no superan los $80 \mu\text{g m}^{-3}$. Tanto de este caso concreto, como de otros que se han analizado, se concluye que las variaciones de ozono son similares con diferencias en los valores medidos según sea el emplazamiento considerado.

Del estudio que se ha hecho de la evolución que experimentan las concentraciones en las estaciones de Sevilla y de Córdoba, se puede indicar que los resultados de forma general reflejan un posible transporte de ozono a lo largo de valle, midiéndose en la sierra de Sevilla y área urbana de Córdoba ozono que probablemente ha sido formado y transportado durante los días previos desde la parte baja del valle. Aunque hay que profundizar y analizar con detalle situaciones concretas.

Con objeto de analizar el ozono en la parte más alta del valle se han estudiado las variaciones de ozono de Asomadilla, Lepanto y Ronda del Valle. En general se ha obtenido que las variaciones que experimentan las medidas de ozono siguen el mismo patrón temporal de comportamiento, observándose en las estaciones urbanas de Jaén numerosos días con un aumento de ozono a primeras horas de la noche e incluso durante la madrugada, en la Fig. 4 se muestra un ejemplo. Este incremento de ozono se produce de forma más acusada en la estación de Fuentezuelas.

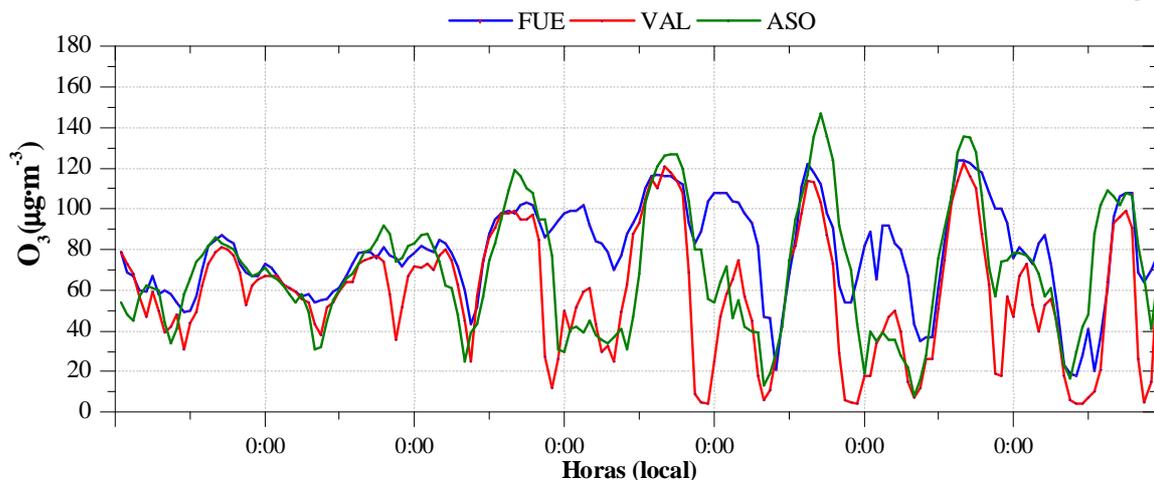


Fig. 4. Evolución del ozono en los emplazamientos de Córdoba y Jaén durante el período del 14 al 20 de septiembre de 2006.

Se hace necesario estudiar con más detalle este tipo de situaciones tan frecuentes e identificar los escenarios meteorológicos bajo los cuales se producen. Pero se puede hipotetizar que su origen estaría en el transporte de ozono desde la zona sur del valle, transportado por las brisas marinas que se generan en la costa y que pudieran alcanzar esta región a estas horas de la noche y madrugada.

De los resultados obtenidos con el análisis de la evolución que experimentan las concentraciones de ozono se propone que el valle del Guadalquivir sea dividido en una primera aproximación en dos zonas. Una primera estaría formada por la provincia de Huelva, bahía de Cádiz, provincia de Sevilla, Córdoba y parte de Jaén. Una segunda estaría formada por toda la zona de sierra ubicada al norte del valle, desde la sierra de Huelva hasta la sierra de Jaén. A su vez, la primera zona se pudiera dividir en tres áreas. En la primera de ellas se englobaría la zona media y costera de la provincia de Huelva y la bahía de Cádiz. La segunda estaría formada por la zona de influencia del área metropolitana de Sevilla extendiéndose unos 20 km al sur de la ciudad y unos 40 km hacia el NE. La tercera la formarían desde la zona media entre las ciudades de Córdoba y Sevilla hasta Jaén.

3.2. Dinámica atmosférica superficial.

Con la finalidad de conocer las rutas en las que puede formarse y transportarse el ozono en Andalucía, se decide llevar a cabo un estudio de la dinámica atmosférica en superficie, la cual viene determinada por el comportamiento que muestra el viento.

Hasta la fecha se han realizado estudios muy generales sobre el viento a nivel de la Península Ibérica y enmarcados dentro de trabajos con un carácter climatológico (Sánchez, 1993; Capel, 2000; Font, 2000). También se pueden encontrar estudios llevados a cabo en Andalucía, pero con un carácter muy puntual y con distintas finalidades, caracterización de masas de aire para estudios de aerosoles (Toledano et al., 2007) o aplicaciones del potencial eólico (Palomares, 2002). En ningún caso se ha realizado un análisis del régimen de viento teniendo como ámbito geográfico de estudio todo el territorio andaluz.



La base de datos horarios que se ha utilizado la ha suministrado el Subsistema de Información de Climatología Ambiental (CLIMA), la cual está formada por una extensa red de estaciones meteorológicas pertenecientes a diferentes organismos, dicho subsistema ofrece la posibilidad de tener acceso a todos los datos meteorológicos que se registran en Andalucía, gracias a la aplicación informática que permite la integración de los datos, el control de la calidad de los mismos, y su explotación conjunta.

Entre las redes que se encuentran en CLIMA se pueden mencionar la Red de Alerta e Información Fitosanitaria (CAP), la Red de Estaciones Automáticas y Remotas de Meteorología (CMA), la Red de Instituto de Meteorología Portugués, la red de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA) de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), la Red de Vigilancia de la Calidad del Aire (SIVA) de la Consejería de Medio Ambiente o la Red de Información Agroclimática (RIA) del Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA), entre otras.

Debido a los estudios previos que se han realizado en la CMAJA, se ha considerado oportuno utilizar los datos de viento suministrados preferentemente por las redes EMA, SIVA y de la RIA.

La red EMA cuenta con un total de 50 estaciones meteorológicas, la red RIA con 98 estaciones, mientras que la CMAJA dispone de 6 estaciones meteorológicas. Por tanto, se tiene un total de 154 emplazamientos de observación. Por estaciones meteorológicas se entiende torres con sensores meteorológicos.

La CMAJA también dispone de sensores meteorológicos ubicados en la parte superior de algunas estaciones de calidad de aire, pero se ha creído conveniente utilizar únicamente las torres. Estas torres se ubican en los alrededores de las áreas industriales de Huelva, la bahía de Algeciras (Cádiz) y Carboneras (Almería), con sensores ubicados a distintas alturas entre 15 a 50 m. Las estaciones de la red EMA tienen los sensores a 10 m, siguiendo las indicaciones de la Organización Mundial Meteorológica, mientras que las de la RIA los tienen a una altura variable entre 2 a 3 m.

Del total de estaciones meteorológicas se ha tenido que realizar una selección de las mismas aplicándose los siguientes criterios:

- Distribución geográfica. Con ello se ha buscado cubrir todo el territorio.
- Longitud temporal de la serie. Se han seleccionado las estaciones que tenían las series de datos más largas, tomándose como año de inicio el 2000, aunque en algunos casos se ha ampliado como es el caso de la estación de El Arenosillo en la cual se ha usado el período 1994-2007.
- Disponibilidad de los datos. Se ha contabilizado el porcentaje de datos válidos para cada año y estación de medida, tomándose aquellas con los porcentajes superiores al 80%.

Tras aplicar los mencionados criterios se han seleccionado 36 estaciones de la AEMET, 33 de la RIA y 3 de la CMAJA, en total 72 estaciones (Fig. 5), con las cuales se ha realizado el estudio. La resolución temporal de las medidas es variable según la red considerada, así los de la red EMA tienen una resolución de 10 minutos, los de la RIA de 30 minutos y los de la CMAJA de 10 y 15 minutos.



Fig. 5. Estaciones meteorológicas seleccionadas de la AEMET, RIA y CMAJA.

Debido a ello se ha tenido que homogeneizar la base de datos, haciendo un filtrado de los mismos, puesto que en numerosas series había “lagunas”, que han tenido que detectarse. El proceso de homogenización ha consistido en pasar los valores 10, 15 o 30 minutos a valores horarios, resolución con la que se ha trabajado.

El estudio del régimen de viento se ha realizado utilizando rosas de viento (diagramas polares en los que se representan la velocidad y dirección del viento) estacionales en tres áreas geográficas de interés que de forma conjunta abarcarían todo el territorio andaluz, como son la costa mediterránea, las cordilleras béticas y el valle del Guadalquivir.

Régimen de viento en la costa mediterránea.

El litoral de las provincias de Almería, Granada, Málaga y Cádiz forman la costa mediterránea andaluza. El régimen de viento durante el invierno presenta una fuerte componente norte, con diferencias según la zona de costa considerada. Así en la costa levantina de Almería la dirección predominante del viento procede del NE, siguiendo la línea de costa. Sin embargo, desde el golfo de Almería y hasta Motril el viento sopla prácticamente del norte. Desde la Axarquía hasta Fuengirola se presenta desde el NW, mientras que en la zona de Estepona ya se observa la influencia del estrecho con viento del NE paralelo a la línea de costa. La bahía de Algeciras está completamente influenciada por el estrecho con viento predominante del levante.

En primavera y meses de otoño el comportamiento del viento es muy similar, presentando lógicamente diferencias según el entorno de la costa mediterránea considerada. Así en el litoral de Almería, ubicada más al este, el viento sopla tanto desde el NE como del W. Desde el golfo de Almería hasta Motril el viento sopla del W y NW, con una componente menor del norte. La costa que rodea la ciudad de Málaga presenta un régimen de viento con direcciones perpendiculares a la línea de costa, SE y NW. La zona de Estepona de nuevo presenta direcciones paralelas a la costa soplando desde el SW y

NE, influenciada por el estrecho. Por último, la bahía de Algeciras tiene como direcciones más frecuentes viento del E y del NW.

Durante los meses estivales, en la costa del levante de Almería se registra mayoritariamente viento del NE (Fig. 6), mientras que en el sur, desde el cabo de Gata hasta la zona de Motril el viento sopla generalmente desde el tercer cuadrante. Es decir, existe la posibilidad de posibles desarrollos de brisa pero que muy probablemente tendrán un escaso recorrido tierra dentro debido a la barrea orográfica que supone Sierra Nevada que se alinea paralela a la costa en esta región.

La ciudad de Málaga presenta cierta diferencia puesto que en esta área el viento se presenta perpendicular a la línea de costa, soplando desde el SE, debido a los desarrollos de brisa que en esta zona si pudieran extenderse hacia el interior a través de la hoya de Málaga en dirección a Antequera. Desde Fuengirola hasta Estepona el viento sopla predominantemente del NE paralelo a la línea de costa y en la bahía de Algeciras procede del NW muy probablemente por la influencia de las masas de aire procedentes del Atlántico las cuales se canalizan a través del valle del Guadalquivir y que se presentan en esta zona soplando desde esta dirección.



Fig. 6. Rosas de viento durante los meses estivales en algunas estaciones de la costa mediterránea andaluza.

Régimen de viento en las cordilleras béticas.

Para el estudio del régimen de viento en todo el sistema Bético se han utilizado estaciones meteorológicas ubicadas en las provincias de Cádiz, Sevilla, Córdoba, Jaén, Málaga, Granada y Almería. Con el fin de conocer los movimientos atmosféricos en esta extensa región se han seleccionado emplazamientos ubicados tanto al norte como al sur y en la zona central.

La parte norte del sistema Bético es a su vez el extremo sur del Guadalquivir y en ella se han seleccionado las estaciones de Villamartín, Osuna, Doña Mencía, Huesa, Cazorla y Don Fabrique. Por el sur se han seleccionado: Ronda, Zafarraya y Cádiar; y en la parte central: Sierra Yeguas, Antequera, Loja, Jerez del Marquesado, Baza, Abla y Tíjola (Fig. 7).



Fig. 7. Rosas de viento durante el verano en estaciones meteorológicas de las cordilleras Béticas.

Se han analizado conjuntamente las rosas de viento de invierno y de verano, en todos estos emplazamientos y no se observa un patrón de comportamiento claro. Esto es debido a la compleja orografía de la región a estudiar, formada por numerosas zonas de sierra y de valle.

Así en la zona de la serranía de Ronda el viento está influenciado tanto por los movimientos atmosféricos que se producen a lo largo del eje del valle del Guadalquivir como por los flujos que se tienen a través del litoral mediterráneo. Sin embargo, en la zona de Loja las direcciones predominantes del viento coinciden con la línea de orientación de la vega de Granada, estando completamente condicionado por la orografía. De esta forma, en cada una de las sierras que forman este amplio territorio las direcciones del viento siguen las líneas de orientación de las laderas y valles.

Como hechos más relevantes se ha encontrado que a través de la hoya de Málaga pudiera haber un canal natural de comunicación entre el mediterráneo y el valle del Guadalquivir, que los flujos del valle del Guadalquivir pudieran penetrar hasta Granada a través de la mencionada vega de Granada y que en la zona de Guadix y Baza pudieran llegar flujos desde el Mediterráneo.

Régimen de viento en el valle del Guadalquivir.

La región que se ha definido como del valle del Guadalquivir es aquella que comprende parte de las cinco provincias más occidentales: Cádiz, Huelva, Sevilla, Córdoba y Jaén. En el estudio que se ha hecho se ha analizado el comportamiento del viento de más de cuarenta estaciones.

Durante el invierno predomina el viento con componente norte en casi la totalidad de la región. En estos meses estos flujos tienen su origen en procesos sinópticos o de gran escala procedentes del norte y centro de Europa y del Atlántico norte, los cuales atraviesan la Península Ibérica y siguen el curso del valle, registrando en las estaciones



ubicadas en el mismo viento desde el NE, como se ha podido observar en emplazamientos desde Jaén (Santa Elena) hasta el litoral de Huelva (El Arenosillo) o Cádiz (Jerez).

En la parte occidental de la provincia de Huelva este viento del norte no se manifiesta desde el NE sino desde el NW, debido a la barrera orográfica que supone la sierra de Aracena y la ausencia de ésta en el Algarve y bajo Alentejo portugués, lo cual hace que pueda llegar viento desde esta dirección. Además, en las zonas de sierra tanto al norte, sierra Morena, como al sur del valle, sistemas Béticos, la dirección del viento en estos meses viene determinada por la orografía local. En la zona del estrecho el viento sopla desde el levante, debido a que los flujos del norte siguen el curso de la costa mediterránea andaluza y son canalizados a través del estrecho en dirección al Atlántico.

Durante la primavera y el otoño hay una superposición de situaciones sinópticas del norte y del sur, así como el desarrollo de procesos de mesoescala. Las situaciones sinópticas del norte originan flujos de viento al igual que ocurre en los meses de invierno, con direcciones del NE en el valle, variables en las zonas de sierra, del NW en la parte occidental de Huelva y del levante en el estrecho.

Las situaciones del sur son causadas por masas marítimas atlánticas que en estos meses barren la Península Ibérica entrando por el golfo de Cádiz. Estos flujos sinópticos con componente sur tienen como consecuencia que en todo el valle se registre viento procedente del SW con ligeras diferencias en las zonas de sierra, posicionándose del W o incluso del NW, como ocurre en la propia ciudad de Jaén.

Además, en estos meses se desarrollan, aunque no con la misma frecuencia que en los meses de verano, los procesos de mesoescala. Es decir, aquellos procesos con un origen térmico y que se desarrollan desde las costas de Huelva y Cádiz y que durante el día se extiende tierra adentro siguiendo el eje del valle del Guadalquivir. Los derrames nocturnos presentarían la dirección opuesta. De esta forma las direcciones que se presentan en las rosas de viento tanto del SW como del NE pueden ser confundidas con los procesos sinópticos, puesto que las direcciones son coincidentes. Sin embargo, en los análisis que se realizan con las evoluciones día a día, se detectan perfectamente con patrones distintos.

En la zona occidental de Huelva el viento del NE es sustituido por el del NW, sin embargo el SW se registra igual que en el resto de emplazamientos del valle. En la zona del estrecho las circulaciones atmosféricas procedentes del sur se canalizan a través del estrecho manifestándose en estaciones como en Vejer o Tarifa con viento del oeste. Así en el estrecho en estos meses se tienen por igual viento del levante y del poniente.

Durante el verano la dinámica atmosférica de la baja atmósfera tiene dos orígenes en la zona de estudio. Procesos sinópticos con prevalencia de entrada de flujos desde el sur causando viento del SW en las estaciones del valle, obsérvese en la Fig. 8, las estaciones de Puebla del Río, La Luisiana, Córdoba o Chiclana de Segura al norte de la provincia de Jaén. Los desarrollos de la brisa marina que se originan en la costa de Huelva y Cádiz y que se extienden hacia el interior del valle también presentan esta misma dirección de flujo, por tanto estas direcciones son una superposición de situaciones sinópticas y de mesoescala. En la zona occidental de Huelva las dos direcciones más frecuentes son las del SW y NW, causada por los hechos ya mencionados.



Fig. 8. Rosas de viento durante el verano en el valle del Guadalquivir.

El viento del poniente es típico en las estaciones del estrecho y su área de influencia, aunque se sigue registrando también viento del levante. En los emplazamientos de sierra Morena y ladera norte de los sistemas Béticos los flujos son variables. Así, por ejemplo, se puede observar como en las estaciones de Cazalla (Sevilla), Hinojosa (Córdoba) y Santa Elena (Jaén) la dirección del viento procede del tercer cuadrante pero en la de Doña Mencía o Jaén ciudad son del NW.

Propuesta de zonificación en función de la evolución de las concentraciones de ozono y del régimen de viento.

De los resultados obtenidos con el estudio de la evolución que experimentan las concentraciones de ozono y el análisis del régimen de viento, se ha considerado oportuna realizar una primera propuesta de zonificación.

Según la dinámica del viento en superficie obtenido en las cordilleras Béticas, ésta se pudieran dividir en once zonas (Fig. 9a), basándose tanto en la división que se ha realizado con ayuda del régimen de viento, como en la complejidad orográfica de esta región.

La costa Mediterránea se ha dividido en cinco zonas (Fig. 9b) según el comportamiento que muestran las concentraciones de ozono y el viento en esta extensa franja costera. Por último, el valle del Guadalquivir es la segunda región más extensa y se ha propuesto dividir este territorio en siete zonas (Fig. 9c).

Con la finalidad de agrupar todos estos resultados obtenidos, se propone una zonificación de Andalucía, como se muestra en la Fig. 10. Por tanto, se propone para Andalucía una división del territorio en 23 zonas, las cuales se detallan a continuación:

Zona 1. Región afectada fuertemente por el estrecho de Gibraltar con un régimen de viento caracterizado por flujos del levante y del poniente; en la que las concentraciones de ozono no llegan a ser muy elevadas.

Zona 2. Área afectada tanto por los movimientos atmosféricos que se producen a través del estrecho, que serían los mayoritarios, y en menor medida también por los flujos que se canalizan por el valle del Guadalquivir. En esta región se han medido concentraciones medias-altas en la estación de Alcornocales.

Zona 3. Parte occidental de la provincia de Huelva que no se ve afectada por el valle del Guadalquivir y si por los flujos procedentes del NW. Esta zona estaría monitorizada con la estación de Cartaya la cual no suele presentar concentraciones muy elevadas.

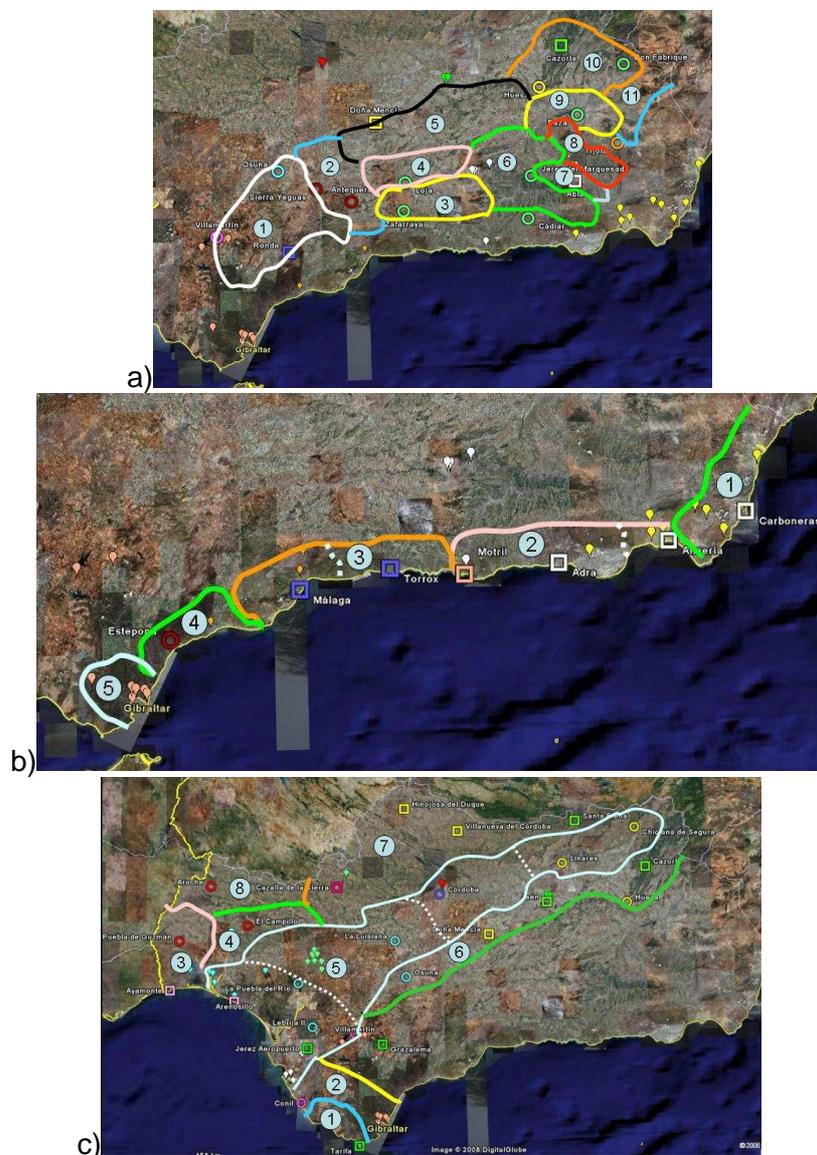


Fig. 9. Propuesta de zonificación a partir de los resultados del viento en los sistemas Béticos, en la costa Mediterránea y en el valle del Guadalquivir.

Zona 4. Región intermedia de Huelva donde se puede registrar viento tanto procedente del valle del Guadalquivir como del NW. En esta zona se ubicaría la estación de Valverde y bajo situaciones de mesoescala se han detectado episodios importantes de ozono.

Zona 5. Eje central del valle del Guadalquivir desde la desembocadura del río Guadalquivir en el golfo de Cádiz hasta el NE de la provincia de Jaén. Esta región se puede dividir a su vez en cuatro áreas de 50 km de recorrido cada una. En ella se encuentran estaciones de diferente tipología con valores distintos pero variaciones que en muchas ocasiones son similares.

Zona 6. Parte norte del valle definida por sierra Morena, la cual engloba territorios de las provincias de Sevilla, Córdoba y Jaén. Monitorizada únicamente con la estación sevillana de Sierra norte, en la que se detectan valores elevados bajo determinadas situaciones atmosféricas.

Zona 7. Parte norte de la provincia de Huelva en la que se encuentra la Sierra de Aracena, afectada mayoritariamente por vientos procedentes del NW de carácter sinóptico.

Zona 8. Con una clara influencia de la canalización que se produce en el estrecho, abarcaría desde Fuengirola hasta la bahía de Algeciras, el viento sopla mayoritariamente paralelo a la línea de costa.

Zona 9. Serranía de Ronda y sierra de Ubrique. Tanto en los extremos al norte y al sur se definen regiones de influencia del valle del Guadalquivir y del estrecho. Esta zona está monitorizada con las estaciones de Prado del Rey y Arcos, caracterizadas por presentar ciclos suaves pero concentraciones medias altas.



Fig. 10. Propuesta de zonificación para Andalucía según los resultados de las variaciones del ozono y del régimen de viento.



Zona 10. Desde el litoral de la ciudad de Málaga, englobando la conocida como hoya de Málaga hasta la zona de Osuna. Esta zona tiene cierta importancia porque con flujos de cierta intensidad podría formar un posible canal natural de comunicación entre el valle del Guadalquivir y el litoral mediterráneo.

Zona 11. Definida por una región que abarcaría desde la Axarquía hasta las cercanías de la ciudad de Málaga.

Zona 12. Sierras de Alhama y Sierra Gorda.

Zona 13. Vega de Granada. A esta zona pudieran llegar flujos desde el valle del Guadalquivir.

Zona 14. Área montañosa con numerosas sierras, entre ellas la de Mágina. La ladera norte formaría un lado del valle del Guadalquivir y en su ladera sur se encuentra la vega de Granada.

Zona 15. Área comprendida desde el cabo de Gata hasta Motril. A su vez dentro de esta zona se pudiera definir un área formada por lo que sería el golfo de Almería. En esta región hay varias estaciones de ozono con valores medios y ciclos marcados.

Zona 16. Región muy extensa con puntos de gran altitud que engloba toda Sierra Nevada.

Zona 17. Zonas de Sierra de Cazorla, Segura y el Pozo.

Zona 18. Hoya de Guadix y Baza, región relativamente llana en la cual desembocan varios valles.

Zona 19. Sierra de los Filabres.

Zona 20. Esta región se pudiera dividir a su vez en varias áreas puesto que engloba una parte de valle entre Sierra Nevada y la sierra de los Filabres y otra parte donde se ubica el desierto de Tabernas con la sierra de Alhamilla al sur.

Zona 21. Región constituida por el litoral del levante de Almería en la cual los flujos de viento siguen la línea de costa o bien proceden del interior de la provincia.

Zona 22. Región relativamente llana con la sierra de los Filabres al sur y la de las Estancias al norte.

Zona 23. Sierra de las estancias.

3.2. Agrupación de emplazamientos de medida de ozono: análisis cluster de k-medias.

Una vez realizado el estudio, de forma general, de las variaciones que presentan las concentraciones de ozono y el régimen de viento, así como de haber realizado una propuesta inicial de zonificación, se ha continuado con la agrupación de las estaciones de ozono. Para ello se han realizado estudios previos (Adame et al., 2007), mostrándose en este apartado de forma resumida los resultados finales.



El análisis cluster es una técnica estadística que se aplica en numerosos estudios atmosféricos (Davis et al., 1998; Jorba et al., 2004), entre ellos la agrupación de estaciones de medida de la calidad del aire (Felipe-Sotelo et al., 2006; Tarasova et al., 2007). Dicho método se ha aplicado a las concentraciones de ozono registradas en las 50 emplazamientos de medida durante el período 2003-2007, en concreto se ha utilizado el cluster no jerárquico de k-medias (Flemming et al., 2005).

Para poder aplicar el análisis cluster de k-medias, es necesario definir una serie de parámetros como son: variable de selección, criterio para la inclusión de una estación de medida en el estudio y número de cluster con los que se va a realizar la clasificación.

El estudio se ha llevado a cabo utilizando como variable de selección la variable horaria (Felipe-Sotelo et al., 2006). Se ha aplicado como criterio para la inclusión de una estación de medida el tener más del 90% de los datos horarios anuales. Para realizar la selección del número de clusters se ha considerado el resultado obtenido en el apartado anterior, es decir la propuesta inicial de 23 zonas.

Se ha considerado oportuno utilizar un número de cluster que coincida con el número de zonas en los que se tiene analizador de ozono. De las 23 zonas propuestas se tiene analizador de ozono en 14 de ellas, por tanto, se ha realizado la agrupación con este número con objeto de conocer si con la aplicación cluster de K-medias, los grupos de estaciones formados coinciden con las zonas propuestas, intentando de esta forma definir con detalle el número de zonas.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 1. Las estaciones de Almería están en dos clusters (3 y 4), mientras que las de Granada están en tres, por un lado la de la ciudad de Granada y por otro la de Motril que está en el cluster 3 con otras estaciones de la costa Mediterránea de Almería y Málaga. Las estaciones de la ciudad de Málaga están separadas en tres clusters.

Las estaciones de la bahía de Algeciras están en tres clusters (7, 10 y 11), formando algunas estaciones un cluster por sí solas, como es el caso de Guadarranque, la Línea o Alcornocales. Sin embargo, todas las estaciones de la bahía de Cádiz están englobadas en un único cluster, el 14.

Las estaciones de Huelva están en tres clusters (8, 12 y 13), estando claramente separadas las estaciones de Cartaya y Valverde del resto de emplazamientos. Las estaciones de Sevilla forman parte de dos cluster (6 y 8), uno en los que se unen a las estaciones de Huelva y otro en los que están con las estaciones de Córdoba.

Las estaciones de Córdoba están en un cluster junto con las de Sevilla, mientras que las de Jaén forman un cluster único.

Como resultados a mencionar sería la agrupación de estaciones separadas geográficamente como son Valverde y Prado del Rey, pero con un mismo carácter rural o que las estaciones de Alcornocales y de Víznar forman cluster únicos. También se han encontrado resultados no esperables como que la estación urbana de Granada se une a otras urbanas y suburbanas de Sevilla. Por último, se puede observar que algunas de las estaciones ubicadas en la bahía de Algeciras forman cluster únicos como la Línea o Guadarranque.

Cluster	Estaciones	Área	Zonas
1	Atabal	Málaga	10
2	Fuentezuelas, Ronda del Valle	Jaén	14
3	El Ejido, Mediterráneo, Motril, Carranque	Costa Mediterránea	10, 11, 15
4	Boticario, Níjar, Marbella	Costa Mediterránea	15, 8
5	Alcornocales	Sierra de Cádiz	2
6	Asomadilla, Lepanto, Granada, Bermejales, Centro, Dos Hermanas, Torneo	Sevilla, Córdoba y Granada	5, 16
7	Cortijillos, Carteya	Bahía de Algeciras	2
8	El Arenosillo, Carmen, Doñana, Orden, Rábida, Aljarafe, Alcalá	Huelva y Sevilla	5
9	Viznar	Granada	16
10	Guadarranque	Bahía de Algeciras	2
11	La Línea	Bahía de Algeciras	2
12	Cartaya	Huelva	3
13	Prado del Rey, Valverde	Huelva y Sierra de Cádiz	4, 9
14	Chapín, Cartuja, Marconi, Río San Pedro, San Fernando	Bahía de Cádiz	5

Tabla 1. Resultados obtenidos de la agrupación con 14 cluster utilizando valores horarios del periodo 2003-2007.

En líneas generales se pudiera indicar que los clusters no reúnen exactamente a estaciones de una misma zona, pero sí en las mismas áreas geográficas. Coincidiendo algunos de los cluster con las zonas inicialmente propuestas. Sin embargo, en algunas de ellas, como en el caso del valle del Guadalquivir, sería aconsejable realizar una mayor división del territorio.

3.3. Mapas de emisión de precursores de ozono.

El conocimiento y aplicación de las emisiones es un aspecto fundamental, que es necesario abordar, para realizar una correcta zonificación de un territorio. La CMAJA viene realizando desde el año 2000 una serie de inventarios de las emisiones atmosféricas que se tienen en la Comunidad Autónoma. El último de estos inventarios es el correspondiente a las emisiones de 2005. En estos documentos se han inventariado una serie de sustancias y se han realizado diversas clasificaciones, según las fuentes de emisiones, las provincias, las actividades, etc.

Debido a que los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM) son las sustancias precursoras del ozono superficial, se ha extraído del mencionado inventario de 2005, los mapas de emisión para toda Andalucía de dichas sustancias (Fig. 11).

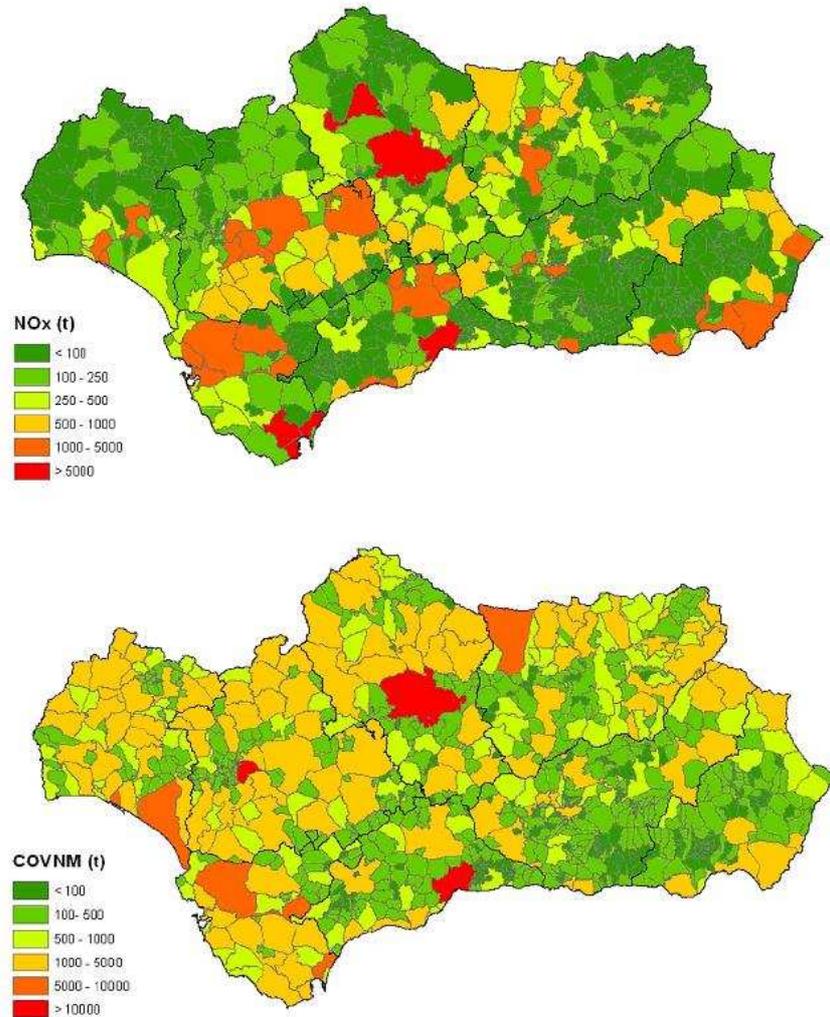


Fig. 11. Mapas con las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM) en Andalucía para el año 2005 (Fuente: Inventario de emisiones 2005 de la CMAJA).

En este inventario se han recopilado las emisiones correspondientes a un total de 771 municipios andaluces, de los cuales 707 (el 70%) presentan emisiones anuales de NO_x por debajo de las 500 toneladas año. Sin embargo, se tienen 34 (4.8%) municipios con emisiones superiores a las 1000 toneladas año. Estos municipios se caracterizan por ser áreas urbanas y/o industriales, destacando la zona de Carboneras, seguida de la bahía de Algeciras y la región de Córdoba. De estos resultados se deduce que las fuentes mayoritarias de NO_x en Andalucía tienen su origen en actividades antropogénicas.

El inventario que se ha realizado de las emisiones de COVNM muestra que en el 92 % de los municipios, las emisiones de COVNM son superiores a las emisiones de NO_x . Mientras que con respecto a las emisiones de NO_x no se pudiera indicar grandes



diferencias en Andalucía, a excepción de las ya mencionadas áreas urbanas e industriales, con las emisiones de COVNM se puede apreciar como es la parte occidental de la Comunidad, en la que se incluiría la zona del estrecho, la que presenta las mayores emisiones a la atmósfera de estos compuestos (Fig. 11). Mientras que en el caso de los NO_x los municipios que superan las 1000 toneladas año son 34, los que superan esta misma cantidad de COVNM son 119.

Las emisiones de COVNM tienen su origen tanto en fuentes antropogénicas como en biogénicas, sin embargo las emisiones biogénicas son superiores. En este caso se pueden destacar las emisiones de COVNM con origen biogénico en la provincia de Huelva con 61000 toneladas, las de Jaén con 36000 o las de Sevilla con más de 20000 toneladas (Inventario de emisiones, 2005).

El objetivo del estudio que se recoge en este apartado es conocer qué niveles de NO_x y COVNM se tienen en las zonas propuestas inicialmente. De la comparativa de estas 23 zonas con las definidas según los inventarios de emisión de NO_x se han realizado una nueva propuesta de 19 zonas, debido a que se considera la unión de tres zonas de la provincia de Huelva y otras ubicadas entre las provincias de Jaén y Granada. La misma comparativa se ha realizado con las emisiones de COVNM, definiéndose 21 zonas, obtenidas de la unión de tres zonas de la provincia de Huelva. Por tanto, de cruzar la información suministrada con las variaciones de ozono, el viento y las emisiones se obtienen un número de zonas que varían entre 19 y 21.

Puesto que se tienen los valores de emisión de NO_x y de COVNM, se ha calculado, el cociente COVNM/NO_x para los 771 municipios de Andalucía, mostrándose los resultados obtenidos en forma de mapa (Fig. 12).

Aquellas regiones que se muestran en la Fig. 12 con un cociente COVNM/NO_x por debajo de 2.5-5 se pudieran considerar como zonas en las que un aumento de las emisiones de COVNM pudiera llevar a la formación de ozono (posible región limitante de COV), generalmente zonas urbanas y suburbanas, aunque como se observa en la mencionada figura también hay numerosas zonas rurales. En estas regiones puede ocurrir que haya realmente emisiones de NO_x de origen antropogénico (actividades industriales) o bien que los niveles de COVNM sean muy bajos por existir escasa vegetación, como pudieran ser zonas de montaña.

Cuando el cociente COVNM/NO_x es muy elevado (posible región limitante de NO_x), mayor que 10, indica que es una región en la que un aumento de las concentraciones de NO_x puede llevar a elevados niveles de ozono. Con estas características se presentan zonas del norte de la provincia de Huelva, toda la parte norte del valle del Guadalquivir, áreas de sierra de Cádiz, Jaén y sierra Nevada.

Se ha comparado el mapa obtenido con el ratio COVNM/NO_x , con las zonas previamente definidas. De esta comparativa se deduce que en algunas zonas previamente definidas habría que realizar una mayor división, como son las zonas de la sierra de Huelva, Sevilla, Córdoba y Jaén. Sin embargo, se propone mantenerlas como están. Sin embargo, al sur del valle del Guadalquivir entre las sierras Béticas y Penibéticas se pudieran unir tres zonas en las que se englobaría las sierras de Alhama y Sierra Gorda, la vega de Granada, y zonas de sierra de Jaén y Córdoba, entre ellas la sierra de Mágina. Por consiguiente a partir de la propuesta inicial y del cociente COVNM/NO_x se pudiera realizar una propuesta de zonificación con 21 zonas.

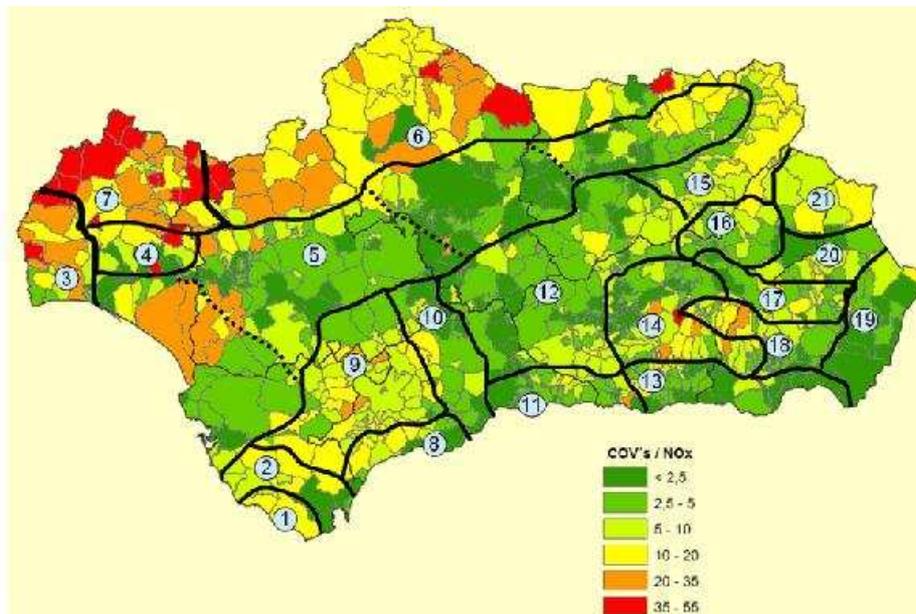


Fig. 12. Valor del ratio COV/NO_x en Andalucía para el año 2005 y propuesta de zonas obtenida con el ozono, el viento, la agrupación de estaciones y el cociente COV/NO_x.

3.4. Otros aspectos.

Captadores difusivos y zonificación.

Durante los últimos años se han realizando campañas en las que se han utilizado captadores difusivos para la medida de distintos gases atmosféricos (ozono, SO₂, NO₂, VOC's) en toda la Comunidad Autónoma de Andalucía.

Con los resultados obtenidos para el ozono durante las campañas de junio, julio y agosto de 2001, junio, julio, agosto y septiembre de 2003 y mayo de 2006 (los valores muestreados pueden considerarse como medias mensuales), en los que se tenían 94 captadores distribuidos en zonas rurales, se ha llevado a cabo un agrupación de los puntos de muestreo utilizándose, no sólo el valor muestreado sino otras variables como la altura del captador, con objeto de evitar que unos valores pesen más que otros.

La agrupación se ha realizado mediante la técnica cluster. En caso de ausencia de datos para una campaña, se utiliza la media de todas ellas para cada captador. Posteriormente, esos valores se han representado en un mapa de Andalucía en forma de Polígonos de Tyessen, es decir, como conjunto de puntos que quedan más próximos a cada punto de muestreo, utilizándose un mismo color para aquellos polígonos que caen en un mismo clúster. Los resultados obtenidos con una agrupación de 15 clusters se muestran en la Fig. 13.

Toda esta labor de diseño de las campañas, puesta y recogida de captadores, análisis en laboratorio de los captadores, análisis e interpretación de la información, así como la confección del mapa de la Fig. 13 ha sido realizada por personal de EGMASA y de la CMAJA.

La agrupación mediante clusters de emplazamientos donde se encuentran los captadores difusivos está dando información de áreas en las que la concentración mensual es similar, siempre considerando que se está tratando de un período temporal de un mes.

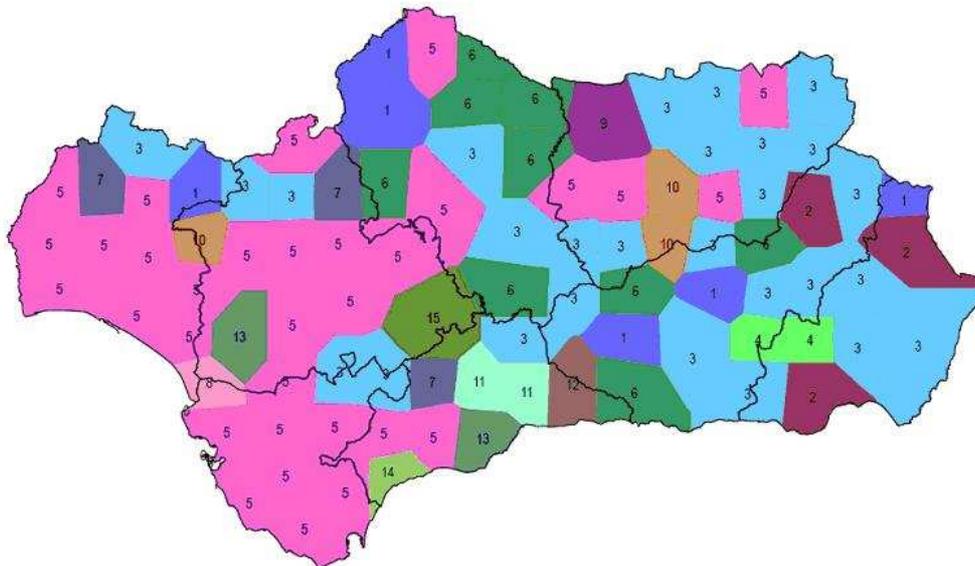


Fig. 13. Agrupación con 15 clusters de los resultados obtenidos con captadores difusivos. Campañas de 2001, 2003 y 2006. (Fuente: EGMASA - CMAJA).

De los resultados obtenidos en estas campañas y del ejercicio de agrupación de zonas (Fig. 13), se puede indicar a grandes rasgos que el cluster 3 representa unos niveles de ozono que se recogen mayoritariamente en la parte oriental de Andalucía. Así mismo, el cluster 5 sería su homólogo en la parte occidental, aunque este último está distribuido en una extensión más amplia del territorio.

Más del 60% de los clusters únicamente se encuentran en una o dos áreas distintas (como ejemplo el cluster 12), mientras que el resto, como los clusters 3 y 5, se distribuyen en un mayor número de zonas.

El valle del Guadalquivir está formado en gran parte por el cluster 5, mientras que las zonas de sierra al norte y sur del valle están formados por distintos cluster, poniéndose de manifiesto las diferencias existentes y que ya habían sido señaladas con los resultados obtenidos previamente.

Se puede observar que la región ubicada entre el valle del Guadalquivir y la franja costera mediterránea, sierras Bética y Penibética, son las que presentan mayor variabilidad con clusters que definen una o dos áreas.

Se ha realizado un análisis comparativo entre la propuesta de zonificación de 23 zonas y la que se ha obtenido con los captadores difusivos. De esta comparativa se puede indicar que más que identificar zonas comunes entre ambas clasificaciones, se ha considerado interesante mostrar a continuación aquellas áreas que son coincidentes y las que no lo son.

Como resultados no coincidentes se tienen los siguientes:

- El cluster 5 engloba en una misma zona gran parte de la provincia de Huelva, de la bahía de Cádiz y de Algeciras, así como de la parte baja y media del Guadalquivir. La definición de esta área geográfica tan extensa no parece muy adecuada para los objetivos que se pretenden, puesto que como se ha puesto de manifiesto con los resultados del viento y con el conocimiento que ya se tiene del comportamiento del ozono, habría regiones con características distintas.
- De igual forma, el cluster 3 que se extiende mayoritariamente por la parte oriental de Andalucía, engloba zonas de Almería, tanto del interior como de la costa, áreas de Granada y sierras al norte de Jaén, las cuales no presentan las mismas características tanto con respecto al régimen de viento como a los niveles de ozono.

Los resultados coincidentes son los siguientes:

- El cluster 4 define la zona de Sierra Nevada que ha sido definida en la propuesta como una única zona.
- El cluster 14 define la zona de Estepona, coincidente con la definida según el estudio de viento y ozono.
- Los cluster 8 y 13 definen una región en la zona de Doñana y bajo Guadalquivir, que también ha sido definida por los resultados obtenidos previamente.
- El cluster 11 define el área metropolitana de Málaga y zona interior, también identificada con el estudio del régimen de viento.

El análisis comparativo mostrado ha servido para corroborar la existencia de algunas zonas concretas y tendencias generales, como la mayor variabilidad de las sierras Béticas y Penibética. Se puede además indicar cómo hipótesis, que al tener una resolución temporal de un mes, no permite identificar con detalle determinadas zonas.

Áreas climáticas y zonificación.

En función de los niveles de precipitación y temperatura se han definido en Andalucía 25 áreas climáticas (Fig. 14), mientras que en la propuesta de zonificación inicial se tienen 23 zonas. Al igual que se ha realizado en apartados anteriores se ha considerado oportuno en este caso comparar la zonificación climática con la propuesta según el régimen de viento y el análisis del ozono.

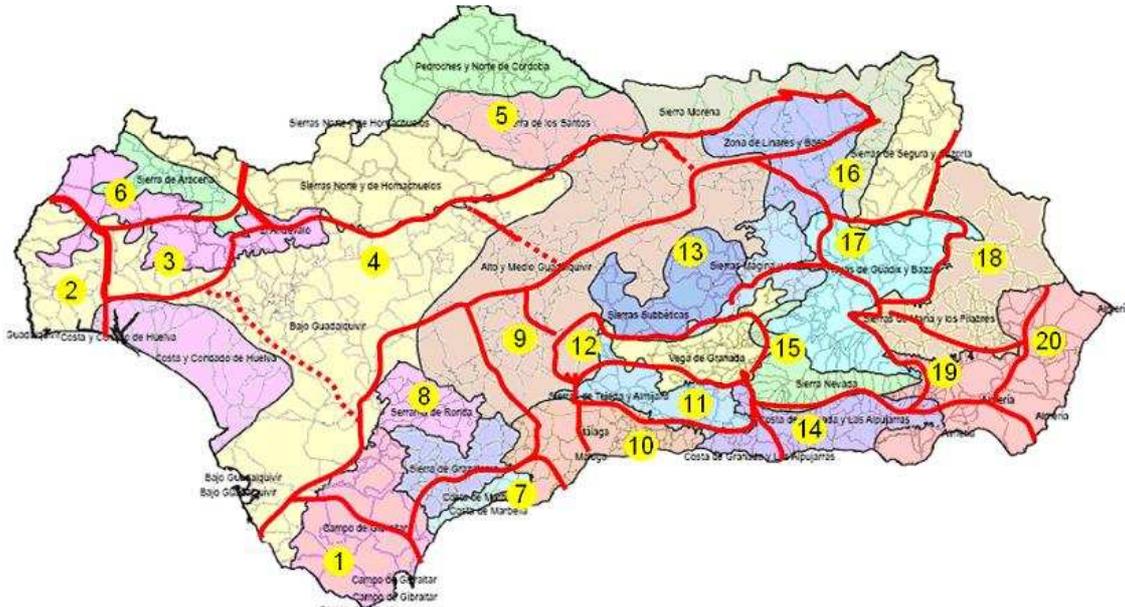


Fig. 15. Propuesta de zonificación según el viento en superficie, las concentraciones de ozono y las áreas climáticas.

4. Conclusiones y propuesta de zonificación final.

Los trabajos orientados a realizar una zonificación de ozono en Andalucía comenzaron con el estudio de los niveles y variaciones que experimentan las concentraciones de ozono en los 50 puntos de monitorización en Andalucía, a continuación se ha analizado la dinámica del viento en superficie, determinándose los regímenes de viento que se tienen en distintos puntos de Andalucía. A partir de estos resultados, se ha realizado una propuesta inicial de zonificación en la que se llegaron a definir 23 zonas en Andalucía.

Seguidamente se ha realizado un ejercicio de agrupación de las estaciones de ozono con ayuda de la técnica de análisis cluster. En este caso se ha estudiado la agrupación de las estaciones en las 14 zonas en las que había monitor de ozono de las 23 inicialmente propuestas, con objeto de realizar una comparación entre los resultados obtenidos en ambos estudios.

El siguiente aspecto que se ha abordado ha consistido en un análisis comparativo con las emisiones de NO_x , a partir de la cual se lleva a cabo una nueva propuesta con 19 zonas, mientras que con las emisiones de COVNM se proponen 21. Respecto a los resultados propuestos con el ratio COVNM/ NO_x también se definen 21 zonas.

Sin embargo, con el estudio que se ha realizado con los captadores difusivos no se ha llegado a proponer ningún cambio respecto a la zonificación inicial puesto que se ha considerado que los resultados obtenidos con los captadores difusivos ha servido para justificar zonas previamente definidas.

Las 25 áreas climáticas también se han comparado con las 23 zonas propuestas y de esta comparativa ha salido una nueva propuesta con 20 zonas, puesto que se ha considerado de interés unificar dos zonas de la bahía de Algeciras y estrecho de Gibraltar, así como tres zonas de sierra ubicadas en la parte oriental de la comunidad.

Por tanto, se tienen un número de zonas que pueden variar entre 19 y 23, según los parámetros y la información que se utilice. Se hace necesario indicar en este punto que el objetivo de este estudio consiste en definir una serie de zonas, afectadas por los mismos procesos atmosféricos y en las que los niveles de ozono puedan mostrar comportamientos similares y en algunos casos concentraciones del mismo orden.

Por tanto, se hace necesario llegar a un compromiso en la definición de un número de zonas, de tal forma que sean suficientes para indicar que hay diferencias tanto en los niveles, como en la variabilidad de las concentraciones de ozono, pero no muy elevado puesto que se haría imposible aplicar de forma correcta las herramientas de gestión de la calidad del aire necesarias.

Por todo ello, se considera que la división de Andalucía en ocho zonas (Fig. 16) cumple perfectamente con todos los requisitos mencionados anteriormente. Debido a que el número de zonas que se han ido definido según los distintos estudios parciales, siempre ha sido mayor, se cree necesario que alguna de estas ocho zonas sean divididas a su vez en distintas áreas.

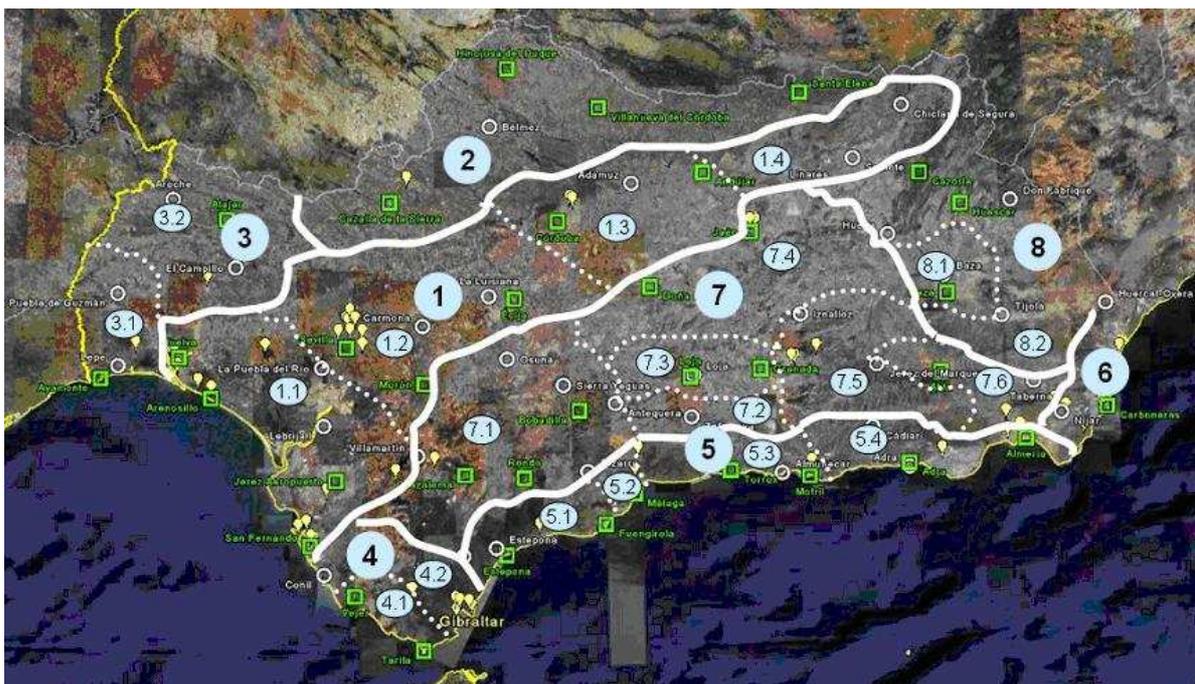


Fig. 16. Propuesta de zonificación de ozono para Andalucía.

A continuación se describen brevemente las ocho zonas propuestas:

Zona 1. Valle del Guadalquivir. Abarcaría una región comprendida desde la costa del golfo de Cádiz hasta zonas del norte de la provincia de Jaén. Como ya se ha mencionado en anteriores ocasiones, esta zona es una de las que presenta mejor monitorización de ozono de toda Andalucía. A su vez esta zona se divide en cuatro áreas con una distancia entre una y otra de aproximadamente unos 50 km desde la franja costera del golfo de Cádiz hacia el interior.



Zona 2. Sierras al norte del valle del Guadalquivir. Estaría formada por numerosas sierras y valles que se ubican al norte de las provincias de Huelva, Sevilla, Córdoba y Jaén. Se ha realizado un estudio de la dinámica del viento con varias estaciones meteorológicas, sin embargo es una región que en el futuro debiera ser mejor monitorizada, puesto que en la actualidad únicamente se tienen los registros de ozono de la estación de Sierra Norte, insuficiente para esta amplia región.

Zona 3. Extremo sudoeste del valle. Estaría formada por parte de la provincia de Huelva y que no se ha definido dentro de la zona del valle del Guadalquivir. A su vez esta región se puede dividir en dos áreas, una al oeste fronteriza con Portugal, en la que escasamente pudiera llegar influencia del valle del Guadalquivir. La segunda abarcaría desde la mitad de la provincia hacia el norte. En esta región la monitorización de ozono es escasa puesto que únicamente se tiene la estación de Cartaya.

Zona 4. Extremo sudeste del valle. Esta zona está ubicada íntegramente en la provincia de Cádiz y sería una zona claramente influenciada por el estrecho de Gibraltar. Sin embargo, se ha considerado su división en dos áreas una de ellas con una fuerte influencia del estrecho y otra algo menos influenciada por éste y que en ocasiones pudiera estar afectado por las corrientes ascendentes y descendentes que se producen a lo largo del valle del Guadalquivir. En esta segunda zona se ubicaría la bahía de Algeciras, con numerosas estaciones de ozono y la estación de Alcornocales ubicada en una zona interior.

Zona 5. Litoral mediterráneo. Estaría comprendida por una extensa franja del litoral mediterráneo de Andalucía desde la provincia de Cádiz hasta Almería. Debido a los resultados obtenidos con el régimen de viento y con la evolución de las concentraciones de ozono, fundamentalmente, se ha considerado que en esta zona pudieran a su vez definirse cuatro áreas. La primera de ellas desde la bahía de Algeciras hasta Fuengirola, la segunda estaría formada por el área metropolitana de Málaga y la zona interior del valle del Guadalquivir donde se tiene un régimen de viento distinto al del litoral de zonas aledañas. La tercera área iría desde la ciudad de Málaga hasta Motril para acabar con el cuarto área desde Motril hasta el cabo de Gata. A lo largo de esta franja costera hay varias estaciones de ozono, por lo que se considera bien monitorizada, registros que han servido para la identificación de las áreas mencionadas.

Zona 6. Litoral mediterráneo almeriense. Esta zona costera de Almería se ubicaría en la costa del levante donde los flujos atmosféricos y las concentraciones de ozono son distintas a las que se tienen en el resto de la provincia. Región con varios emplazamientos para la medida de ozono, por tanto se considera suficientemente monitorizada.

Zona 7. Esta región presenta una orografía muy compleja con numerosas sierras y valles, de los resultados obtenidos con el análisis del régimen de viento e inventarios de emisiones, se ha considerado oportuno dividirla en al menos 6 áreas, las cuales se describen a continuación.

7.1. Abarcaría una región desde la serranía de Ronda, incluyendo el interior del valle del Guadalquivir y la zona de Antequera. En ellas se ubican estaciones como las de Prado del Rey y Arcos de la Frontera.

7.2. Formado por las sierras de Alhama y sierra Gorda.

7.3. Vega de Granada donde pudieran penetrar los flujos del valle del Guadalquivir.



7.4. Zona ubicada al norte con numerosas sierras como las de Mágina y que formaría la barrera montañosa al sur del valle del Guadalquivir.

7.5. Englobaría la conocida sierra de Granada, siendo una región muy extensa y caracterizada por presentar puntos de enorme altitud.

7.6. Zona de valle entre sierra Nevada y la sierra de los Filabres.

Zona 8. Al igual que la anterior, es una región con numerosas sierras y sería la prolongación natural de la zona 7. En ella a su vez se pudieran definir dos áreas, una localizada en la hoya de Baza y otra mas extensa y montañosa que englobaría al sur la sierra de los Filabres y al norte numerosas sierras como las de Cazorla, Segura, el Pozo o las Estancias.

La implantación de nuevos puntos para la monitorización de ozono, en áreas no monitorizadas actualmente, la reubicación y optimización de la red, los datos obtenidos en campañas experimentales con unidades móviles y las tareas de modelización, ayudaran en el futuro a corroborar las zonas propuestas, a que las áreas definidas dentro de una zona pasen a ser zonas independientes o incluso que se unifiquen zonas previamente propuestas. Lo cual indica que esta primera propuesta de zonificación de ozono para Andalucía no es definitiva sino que puede ser mejorada en función de los nuevos conocimientos que se vayan adquiriendo sobre el ozono superficial en Andalucía.

Referencias.

Adame, J.A., Lozano, A., Bolívar, J.P., De la Morena, B., Contreras, J., Godoy, F. 2008. Behaviour, distribution and variability of surface ozone at an arid region in the South of Iberian Peninsula (Seville, Spain). *Chemosphere*, 70, 841-849.

Adame, J.A., Lozano, A., De la Morena, B., Contreras, J., Bolívar, J.P., Godoy, F. 2007. Analysis of the ozone concentrations in Seville metropolitan area (Spain). *European Geosciences Union. Geophysical Research Abstracts*, Vol 9, 01854.

Boian, C., Kirchhoff, V. 2005. Surface ozone enhancements in the south of Brazil owing to large-scale air mass transport. *Atmospheric Environment*, 39, 6140-6146.

Capel Molina, J. 2000. *El clima de la Península Ibérica*. Editorial Ariel Geografía.

Darby, L., McKeen, S., Senff, C., White, A., Banta, R., Post, M., Brewer, W., Marchbanks, R., Alvarez, R., Peckham, S., Mao, H., Talbot, R. 2007. Ozone differences between near-coastal and offshore sites in New England: Role of meteorology. *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, d16s91, doi:10.1029/2007jd008446.

Davis, J.M., Eder, B.K., Nychka, D., y Yang, Q. 1998. Modeling the effects of meteorology on ozone in Houston using cluster analysis and generalized additive models. *Atmospheric Environment*, 32, 14/15, 2505-2520.

Felipe-Sotelo, M., Gustems, L., Hernandez, I., Terrado, M., Tauler, R. 2006. Investigation of geographical and temporal distribution of tropospheric ozone in Catalonia (North-East Spain) during the period 2000-2004 using multivariate data analysis methods. *Atmospheric Environment*, 40, 38, 7421-7436.



- Flemming, J., Stern, R. y Yamartino, R.J. 2005. A new air quality regime classification scheme for O₃, NO₂, SO₂ and PM₁₀ observation sites. *Atmospheric Environment*, 39, 6121-6129.
- Font Tullot, I. 2000. *Climatología de España y Portugal*. Ediciones Universidad de Salamanca. 422 pp.
- Jenkin, M.E. 2008. Trends in ozone concentration distributions in the UK since 1990: Local, regional and global influences. *Atmospheric Environment*, 42, 5434-5445.
- Jorba, O., Pérez, C., Rocadenbosh, F., y Baldasano, J.M. 2004. Cluster análisis of 4-day back trajectories arriving in the Barcelona area, Spain, from 1997 to 2002. *Journal of Applied Meteorology*, 43, 887-901.
- Palomares, A.M. 2002. *Caracterización del régimen de vientos y desarrollo de un modelo de predicción eólica a escala local en el estrecho de Gibraltar*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- Sánchez, J. 1993. *Situaciones atmosféricas en España*. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. Ed. Centro de Publicaciones, 285 pp.
- Tarasova, O. A., Brenninkmeijer, C. A. M., Joeckel, P., Zvyagintsev, A. M., Kuznetsov, G. I. 2007. A climatology of surface ozone in the extra tropics: cluster analysis of observations and model results. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 24, 6099-6117.
- Toledano, C., Cachorro, V. E., de Frutos, A. M., Sorribas, M., Prats, N., de la Morena, B. A. 2007. Inventory of African desert dust events over the southwestern Iberian Peninsula in 2000-2005 with an AERONET Cimel Sun photometer. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 112, D21201.