

GRUPOS DE TRABAJO

OPTIMIZACIÓN DE REDES, CAMPAÑAS EXPERIMENTALES
E INTERPRETACIÓN DE DATOS

V SEMINARIO DE CALIDAD DEL AIRE EN ESPAÑA

Santander, 16, 17 y 18 de Octubre de 2006

Coordinación:

José Jaime Diéguez y Millán Millán (CEAM)

Componentes:

Jose Antonio Adame (INTA)

Andrés Alastuey (CSIC)

Begoña Artiñano (CIEMAT)

Manuel Callejas (Consejería de Medio Ambiente y Desarrollo Rural - IIAA. Castilla-La Mancha)

Juan Carlos Casado (Consejería de Industria y Medio Ambiente. Murcia)

José Carlos Cerro (Consejería de Medio Ambiente. Islas Baleares)

Rosario Colle (Consejería de Medio Ambiente. Castilla y León)

Santiago Jiménez (Ministerio de Medio Ambiente)

Javier Lavín (Consejería de Medio Ambiente - CIMA. Cantabria)

Antonio Lozano (Consejería de Medio Ambiente. Andalucía)

Rafael Orts (Conselleria Territorio y Vivienda. Comunidad Valenciana)

María Pallarés (Ministerio de Medio Ambiente)

Eduardo Pinilla (Universidad de Extremadura)

INDICE

0. INTRODUCCIÓN.....	1
1. OPTIMIZACIÓN DE REDES AUTOMÁTICAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE	6
1.1. METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE REDES DE CALIDAD DEL AIRE.	7
1.2. REPRESENTATIVIDAD DE EMPLAZAMIENTOS.....	16
1.2.1. Ubicación de estaciones. Criterios de macro y microimplantación.	18
2. INTERPRETACIÓN DE DATOS DE LAS REDES AUTOMÁTICAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE.....	23
2.1. ANÁLISIS DE DATOS Y REPRESENTACIÓN ADECUADA DE LAS SERIES TEMPORALES.....	28
2.1.1. Caracterización de patrones espacio-temporales de las concentraciones y las variables meteorológicas.....	29
2.1.2. Evolución de los registros horarios. Relación de las variables de concentración entre sí y con las variables meteorológicas.	35
2.1.3. Caracterización de episodios de alta concentración de contaminantes.....	41
2.1.4. Interpretación de series de datos y control de calidad.....	48
2.2. CRITERIOS UNIFICADOS DE MANEJO DE LOS DATOS.	50
2.2.1. Almacenamiento de datos.....	51
2.2.2. Agregación y cálculo de datos.	53
3. CAMPAÑAS EXPERIMENTALES	56
3.1. USO DE UNIDADES MÓVILES PARA LA OPTIMIZACIÓN DE REDES.....	56
3.1.1. Campañas experimentales para la estimación de la calidad del aire en áreas/zonas donde no exista información previa.	56
3.1.2. Campañas experimentales para el estudio de la representatividad de los puntos de medida.	63

3.2.	OTRAS TÉCNICAS DE MEDIDA COMPLEMENTARIAS.....	66
3.2.1.	Campañas de dosimetría pasiva para estudio de la distribución espacial de concentraciones.	66
3.2.2.	Obtención de Información complementaria sobre parámetros que no se miden de forma rutinaria.	74
4.	OTROS ASPECTOS RELACIONADOS CON LA OPTIMIZACIÓN DE LAS REDES.....	78
4.1.	OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA DE LAS REDES DE VIGILANCIA. INTEGRACIÓN DE LAS REDES PRIVADAS EN LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE.....	79
4.2.	SISTEMAS DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE.	86
5.	BIBLIOGRAFIA:.....	88

0. INTRODUCCIÓN

Debido a las peculiaridades orográficas y meteorológicas la dinámica de contaminantes en España, y en general en el sur de Europa, no responde exactamente a los mismos patrones espacio-temporales que en el centro o el norte del continente. Por otro lado, la implementación de las directivas para la evaluación y gestión de la calidad del aire (la 96/62/CE y sus derivadas para distintos contaminantes), y en particular de las herramientas de evaluación allí contempladas: redes automáticas, modelización numérica, campañas experimentales, etc., ha de servir para el control del cumplimiento legal, siguiendo los criterios allí establecidos, y a la vez también ha de permitir avanzar en el conocimiento de la situación de la calidad del aire, y del grado de exposición de la población y la vegetación. De esta manera, en caso necesario dichas peculiaridades podrán ser tenidas en cuenta en las sucesivas enmiendas o revisiones de la legislación a nivel comunitario. Por tanto, es importante aprovechar el margen que dejan las directivas para la adaptación de las estrategias y herramientas de evaluación, en aras de posibilitar dicho avance en el conocimiento, y la consecuente mejora en la evaluación de la calidad del aire en España.

En particular, el tener en cuenta esta posibilidad en el diseño del **mapa de zonas** y en la **distribución de estaciones** de las redes automáticas será decisivo en este sentido, y además puede traducirse en unos resultados de la evaluación más ajustados al patrón espacial de las concentraciones de contaminantes en España.

En este documento se recomiendan unos criterios de zonificación y optimización de redes **automáticas** basados en la identificación de cuencas aéreas (entendida como área geográfica definida por la orografía en la cual los niveles de contaminantes están influidos fundamentalmente por las mismas fuentes, y por los mismos procesos de transporte de la masa aérea desde dichas fuentes), dentro de las cuales se debe procurar separar zonas de **calidad del aire equivalente**. De esta forma la medida en **emplazamientos representativos** dentro de estas zonas proporciona un conocimiento real de la situación de la calidad del aire en todo el territorio.

En este contexto se entiende que la calidad del aire en dos puntos es equivalente cuando sus niveles de concentración sitúan a ambos puntos en el mismo intervalo dentro de los que definen los parámetros de calidad establecidos en la legislación. Esto es, por debajo o por encima de los valores límite y valores objetivo¹ en la base de tiempo anual que corresponde a cada evaluación.

¹ En el caso particular de las aglomeraciones no se recomienda la división de estas en varias (sub)zonas, en base al criterio anterior, por razones de operatividad, y por la propia definición original de este tipo de zonas en la directiva.

Una de las cuestiones que subyace en este criterio de zonificación es la situación de **contaminación a escala regional en el sur de Europa** relacionada con el **ozono**, evidenciada por las redes automáticas de vigilancia año tras año, y recogida en los subsiguientes informes técnicos anuales de la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA) [ref. 1,2,3]. Esta diferenciación en los niveles de ozono, y en las causas que los producen, ha sido también reconocida por la propia Comisión Europea en su decisión 2004/279/CE, relativa a las directrices de aplicación de la directiva de ozono, en base a la evidencia científica obtenida en los proyectos europeos liderados desde España MECAPIP, RECAPMA y SECAP [ref. 4,5]. Por tanto en España, más que en el centro y norte de Europa, hemos de tener especial esmero a la hora de delimitar las zonas, intentando acotar en la medida de lo posible las áreas de niveles elevados para evitar que, a causa de la obligación de medir en los puntos de mayores concentraciones dentro de cada zona, la evaluación se traduzca cada año en un mapa con la mayoría de las zonas por encima del valor objetivo.

Por otro lado, independientemente del mapa de zonificación, los gestores de la calidad del aire han de llegar a establecer las relaciones causa-efecto que determinan las concentraciones de contaminantes en el territorio de su competencia, sin las cuales es difícil planificar y ejecutar las medidas o planes adecuados (planes a corto y a largo plazo contemplados en la directiva 96/62/CE y derivadas) para progresar hacia los parámetros de calidad (valores límite y objetivo). Para ello es preciso identificar fuentes de emisión, cuencas aéreas, dentro de ellas las rutas de transporte habitual de las emisiones (que vienen determinadas por las peculiaridades meteorológicas y orográficas al principio aludidas), y finalmente, analizar el gradiente de las concentraciones a lo largo de estas rutas. En consecuencia, ya que es fundamental para el gestor de la calidad del aire un mínimo conocimiento de la dinámica de contaminantes en el territorio de su competencia, considerarlo de partida en el diseño de las zonas y en la distribución de los puntos de medida parece lo más razonable (aunque no lo mas fácil).

La alternativa a este esquema de diseño de zonas, igualmente válida desde el punto de vista del cumplimiento legal y muy extendida, consiste en delimitar las zonas en base a otros criterios cualesquiera, cumpliendo en cada una de ellas todas las especificaciones establecidas en la legislación: número mínimo de puntos de medida, criterios de micro y macroimplantación, y sobre todo, evaluar cada zona con arreglo a los métodos establecidos en función de cuales son los niveles registrados en los puntos de máximas concentraciones en relación con los umbrales inferior y superior de evaluación (objetivo a largo plazo en el caso del ozono). La gran desventaja de este esquema es que la evaluación de una zona no es extensible a todo el territorio que abarca (en general corresponderá a la peor calidad del aire que se registra en dicha zona), y por tanto

puede plantear dificultades para trasladar la información de la calidad del aire a la población. Además no garantiza el objetivo deseable de avanzar en el conocimiento de la dinámica de contaminantes.

En el Capítulo 1 se propone una **metodología** para la optimización de redes orientada a la optimización de la distribución de las estaciones (número y ubicación adecuadas), y la optimización del mapa de zonificación, que se fundamenta en los argumentos antes señalados.

Para todo ello las series de datos que proporcionan las redes de medida en continuo han de ser analizadas mediante el uso de herramientas y procedimientos que permitan la correcta **interpretación de los datos**. El Capítulo 2 recoge los aspectos más básicos que se deben tener en cuenta para la correcta interpretación de los datos. Además, en algunas zonas la caracterización de los patrones espacio-temporales de las concentraciones precisará recurrir a **campañas experimentales** en los periodos y puntos adecuados para completar el análisis de la calidad del aire (generalmente, aunque no siempre, a causa de deficiencias en la cobertura espacial de las propias redes automáticas). El Capítulo 3 trata sobre el uso de las unidades móviles y técnicas alternativas de medida como la dosimetría pasiva en campañas experimentales.

Este es un grupo de trabajo nuevo, creado para el V Seminario de la calidad del aire en España, y algunos de los temas que aquí se abordan, como la interpretación de datos o el diseño de campañas experimentales, no se habían contemplado hasta ahora por grupos de trabajo anteriores. Otros aspectos por el contrario sí han sido tratados por el grupo de "Evaluación preliminar, posterior y modelización de la calidad del aire" dentro del IV Seminario de la Calidad del Aire, y ahora se retoman y revisan. Gran parte del esfuerzo de dicho grupo de trabajo se dirigió a la descripción e interpretación de la directiva marco y sus derivadas. La necesidad de una rápida asimilación de su contenido en cuanto a los nuevos parámetros de calidad definidos, y a las herramientas y criterios de evaluación, desde la zonificación a los métodos de evaluación aplicables en cada caso y la selección de los emplazamientos de medida, requerían una explicación detallada de las directivas, y una guía práctica para su aplicación según los nuevos criterios que introducían.

Actualmente la mayor parte de estos aspectos están suficientemente asimilados por los gestores de la calidad del aire en España (las CCAAs), por lo que no se precisa el mismo esfuerzo descriptivo. En otros aspectos, sin embargo, es conveniente una revisión de los criterios. Entre este documento y el elaborado por el grupo "Evaluación preliminar, posterior y modelización de la calidad del aire" en mayo de 2000 han pasado ya seis años, en los cuales, entre otras cosas, se

han publicado dos nuevas directivas derivadas (la 2000/69/CE relativa al benceno y el monóxido de carbono, y la 2002/03/CE relativa al ozono), se ha acumulado mucha experiencia en la aplicación de estas directivas, y no menos importante, las redes automáticas han acumulado 6 años de datos que posibilitan un diagnóstico mejorado del fenómeno de la contaminación atmosférica en España, y de las posibilidades de optimización de las propias redes. Así, temas clave como la zonificación y la distribución geográfica de las estaciones automáticas requieren una revisión por parte de todos los implicados en la gestión de la calidad del aire.

Por último, en todas las recomendaciones en cuanto a metodología, procedimientos y herramientas a aplicar que se proponen en este documento, se ha tenido en cuenta en primer lugar los recursos materiales propios con los que cuentan los gestores de la calidad del aire en España. Estos recursos básicamente consisten en las redes automáticas de calidad del aire y las series de datos históricos asociadas. Estas redes generalmente disponen de un número variable de estaciones fijas, y de una o dos estaciones móviles para la medida en otros emplazamientos de interés. Es importante subrayar que todas estas recomendaciones son inviables en la práctica si no se dispone además, por parte de los organismos responsables de la gestión de la calidad del aire, de **otros recursos técnicos y humanos especializados**. Esto implica entre otras cosas una dotación económica suficiente para la adquisición y mantenimiento de los equipos necesarios, y la consolidación de un mínimo número de técnicos con cierto grado de experiencia en las prácticas asociadas al manejo y el análisis e interpretación de datos con herramientas adecuadas.

No obstante, la complejidad del fenómeno de la contaminación atmosférica que abarca diferentes campos relacionados con la física y química de la atmósfera, entre ellos: meteorología aplicada al transporte y dispersión de contaminantes, química atmosférica, modelización numérica, etc., requerirá en muchos casos del apoyo de especialistas en dichos campos. La "masa crítica" de personal y medios materiales, al día de los conocimientos científicos más recientes, que es necesaria para aportar los criterios, procedimientos y herramientas para la evaluación de la calidad del aire, no siempre es asumible por una sola CCAA. En esos casos es importante el papel que juegan centros de investigación de referencia en sus respectivos campos apoyando a los gestores de la calidad del aire. De la fructífera relación de estos expertos en la gestión y en la investigación de la dinámica de contaminantes este grupo de trabajo pretende ser un buen ejemplo.

Nota aclaratoria: Excepto donde conste de forma explícita, todos los ejemplos gráficos que aparecen en el documento se han elaborado a partir de series de datos de diversas estaciones de las redes automáticas de control de la calidad del aire que han sido proporcionados por el ministerio de Medio Ambiente, aunque las fuentes originales, propietarias y responsables de estos datos, son las correspondientes administraciones autonómicas.

1. OPTIMIZACIÓN DE REDES AUTOMÁTICAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE

La calidad del aire en una región está determinada no solo por la distribución geográfica de las fuentes de emisión, sino también por **procesos físico-químicos** en la atmósfera que siguen pautas espaciales y temporales características. En estos procesos se superponen todas las escalas espacio-temporales, desde la escala local a la sinóptica pasando por la mesoescala, prevaleciendo unas sobre las otras en diferentes épocas del año y en diferentes puntos del territorio. Además ocurren en la dimensión horizontal, pero también en la vertical, con mecanismos como la creación de estratos en altura, y la fumigación y/o la recirculación de estos estratos sobre la superficie, que contribuyen de forma muy significativa en la evolución de las concentraciones. Por último la orografía condiciona enormemente los procesos de dispersión y transporte de contaminantes, especialmente en nuestras latitudes y con una configuración orográfica tan compleja como la nuestra.

La evaluación adecuada de la calidad del aire requiere disponer de **redes automáticas** que capturen la variabilidad espacio-temporal de las concentraciones en su área de implantación, con especial atención a las zonas de mayor probabilidad de superación de los valores legales de referencia, donde la medida en continuo es un requisito establecido en las directivas. Para ello es preciso el conocimiento previo de las circulaciones y procesos atmosféricos recurrentes que determinan, junto con las emisiones, los patrones espacio-temporales de las concentraciones de contaminantes.

La **modelización** meteorológica y de la calidad del aire son otra herramienta extremadamente útil para la optimización de las redes, y en general para la gestión de la calidad del aire. La envergadura de esta herramienta la hace inabarcable dentro de este grupo de trabajo, y en cualquier caso ya existe otro grupo de trabajo específicamente dedicado a la modelización para abundar en esta herramienta. En este apartado únicamente se señala como deben encajarse estas herramientas dentro del procedimiento. De momento su uso por parte de los gestores no es una práctica generalizada, y menos de modelos adaptados a la orografía compleja del sur de Europa, que incorporen adecuadamente los procesos en la escala regional o meso-meteorológica. Pero su aplicación cada vez más extendida permitirá en el futuro incluso reducir las exigencias de medida en continuo. Para llegar a ello los modelos habrán de ser validados con medidas de redes meteorológicas y de calidad del aire optimizadas en el sentido señalado en el párrafo anterior.

1.1. METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE REDES DE CALIDAD DEL AIRE.

La metodología propuesta va encaminada a encontrar el número y la distribución óptima de estaciones de una red automática de medida en continuo de la calidad del aire. Dicha optimización se orienta a la evaluación de la calidad del aire según los criterios establecidos por la directiva 96/62/CE y sus directivas derivadas específicas para distintos contaminantes, ya transpuestas a la legislación española en los RDs 1073/2002 y 1796/2003. Entre ellas, la aplicación de la 2002/03/CE relativa al ozono troposférico, implica diferencias sustanciales en las estrategias de evaluación, debido al comportamiento en muchos aspectos opuesto de este contaminante de carácter secundario respecto a otros contaminantes de carácter primario.

Al contrario que los NO_x, por citar otro contaminante que junto al ozono presenta un número significativo de superaciones de los valores límite establecidos, el ozono se encuentra generalmente en concentraciones elevadas fuera de las áreas de emisión de sus precursores, en ocasiones en áreas rurales alejadas de estas, y durante primavera y verano, cuando la actividad fotoquímica en la atmósfera es mayor. Además la nueva directiva en fase de elaboración que unifica la directiva marco y sus derivadas, aumenta las exigencias en cuanto a vigilancia y control de la fracción PM_{2.5} de las partículas sedimentables, para las cuales el patrón espacial de concentraciones abarca, además de la escala local (urbana y/o industrial), también las escalas mayores, desde la regional a la continental.

La optimización de las redes de calidad del aire, orientadas originalmente a la vigilancia de los niveles de contaminantes en los entornos de grandes emisiones, **áreas urbanas e industriales**, ha de servir sobretodo para la mejora de su **cobertura espacial**, abarcando no solo estas áreas donde se concentran las emisiones y la población, sino también el **resto del territorio**, donde se detectan los mayores niveles de ozono, y donde los objetivos de protección a la salud humana y de protección a la vegetación son también de aplicación. En cualquier caso, conviene igualmente una revisión de la distribución de estaciones dentro de ambientes urbanos e industriales en relación con los criterios de micro y macro implantación, y con el objetivo de mejorar la evaluación de la exposición de la población a los contaminantes.

Uno de los criterios de evaluación establecidos en la legislación vigente es el uso de la **zona** como unidad de gestión de la calidad del aire. La zonificación es un elemento clave en la vigilancia y el control de la contaminación porque condiciona la distribución de estaciones, y en general toda la gestión posterior de la calidad del aire.

La zonificación actual, realizada de forma independiente por cada CCAA, se ha hecho sobre la base de la distribución de estaciones automáticas disponibles en 1999-2000 en cada comunidad (generalmente sin tener en cuenta los procesos naturales involucrados en la dispersión de los contaminantes, y la continuidad del transporte de la masa aérea contaminada, que a menudo traspasa las fronteras administrativas).

En consecuencia en muchos casos el mapa de zonificación tiende a arrastrar en su diseño carencias que tienen su origen en una distribución poco óptima de las redes desde el punto de vista actual.



Figura 1.1: Mapa de zonas (actualizado 2004 con datos proporcionados por el ministerio de Medio Ambiente)

Así, en algunas CCAAs la zonificación muestra una tendencia a delimitar y aislar las áreas urbanas e industriales donde se localizan las mayores emisiones, dejando el resto del territorio en una única zona o bien en un número reducido de ellas, dentro de las cuales no hay razones para presumir una **calidad del aire equivalente** en toda su extensión (al menos en cuanto a ozono y en los términos expresados en la introducción). Este criterio de zonificación puede ser válido para

la evaluación de la mayor parte de los contaminantes primarios², pero requiere su revisión para la adecuada vigilancia del ozono troposférico, y probablemente también de las partículas PM10 y PM2.5. Para estas últimas se están elaborando actualmente, dentro de la nueva propuesta de directiva de calidad del aire, objetivos de calidad en forma de valores límite, valores objetivo, y objetivos de reducción de la exposición [ref. 6].

Teniendo en cuenta que partimos de una zonificación ya establecida, la metodología propuesta ha de servir para comprobar la correcta evaluación de todos los contaminantes en cada una de las zonas actuales, permitiendo identificar aquellos casos en los que el diseño de la zona no sea el adecuado a los criterios de evaluación (en la medida en que no presenta una calidad del aire equivalente en todo el área incluida), o no lo sea la distribución de estaciones.

Como resultado de la aplicación del procedimiento propuesto al análisis de una zona se llegará básicamente a alguna de las siguientes conclusiones: 1) la zona y los emplazamientos de medida en ella ubicados son adecuados a los criterios de evaluación, 2) los emplazamientos existentes no garantizan la **representatividad** de las medidas en toda la zona, y se requiere la selección de otro/s punto/s de medida en la zona, o por último, 3) la zona comprende un área donde la calidad del aire no es equivalente en toda su extensión. En este último caso será necesario replantear el diseño de la zona afectada y la reubicación de los puntos de medida.

La metodología que se propone esta concebida para su aplicación por parte de los **gestores** de la calidad del aire. Para ello se basa en la explotación de la información y recursos disponibles por estos, que son fundamentalmente las **bases de datos** históricas de las redes automáticas y las propias redes. Estas bases de datos, con una mejor o peor cobertura espacial y temporal, están disponibles para todos los gestores de la calidad del aire, puesto que son sus propios recursos. Otro tipo de herramientas y fuentes de información complementarias como la procedente de **campañas experimentales** se tratan con algo de detalle en el apartado 3, con especial atención al uso de las **unidades móviles**, con las que generalmente se cuenta en todas las CCAAs como complemento a las estaciones fijas, y al diseño de campañas de medidas mediante el uso de la **dosimetría pasiva**.

Para el propósito de optimización de una red automática toda información complementaria a la base de datos histórica, incluidos los resultados de ejercicios de modelización, será tanto más necesaria cuanto mayores sean las carencias en la cobertura espacio-temporal de la red.

² A excepción de las emisiones de chimeneas altas de grandes instalaciones, afectadas por procesos de transporte a larga distancia pero vigiladas generalmente en el entorno inmediato a la chimenea.

El diagrama de flujo de la figura 1.2 muestra la metodología propuesta. El procedimiento se aplica en tres fases, de forma secuencial, y en general requerirá de varias iteraciones. La aplicación de una iteración puede ser una labor de 1 a varios meses dependiendo de los medios y recursos humanos disponibles, de la cantidad de información a analizar, y de la extensión geográfica considerada. Entre una iteración y la siguiente es necesario que transcurra un tiempo mínimo (abarcando al menos el periodo estacional en el que el contaminante analizado muestra las mayores concentraciones), durante el cual la red proporcionará nuevos datos que permitirán ampliar el conocimiento de los patrones espacio-temporales de las concentraciones de contaminantes en la zona.

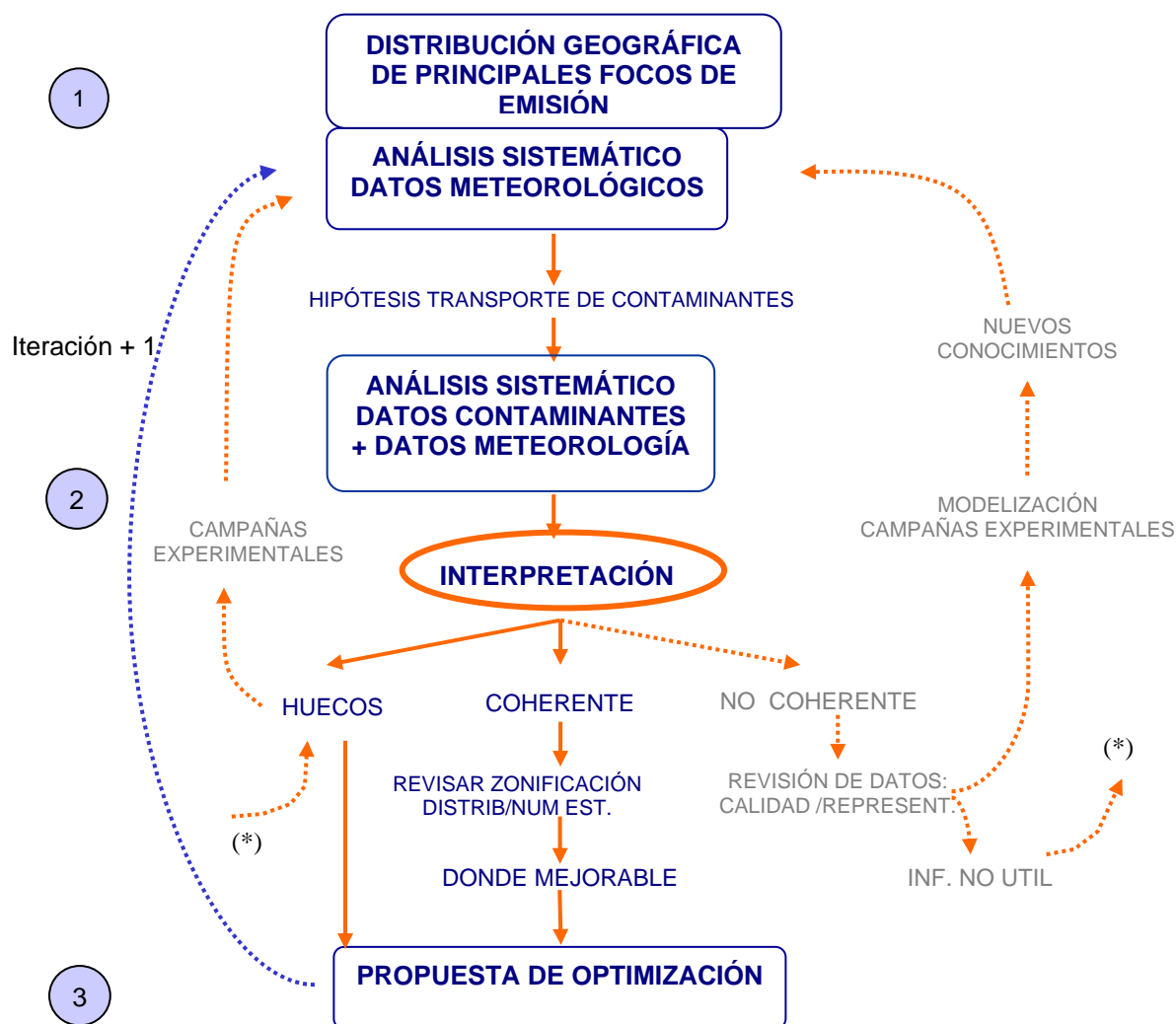


Figura 1.2: Diagrama de flujo de información y fases del procedimiento de optimización propuesto.

En cualquier caso la metodología va encaminada a mejorar la red disponible, sea cual sea su estado, y su aplicación reiterada a una red sucesivamente mejorada en cada iteración, permitiría alcanzar la distribución espacial más adecuada a los objetivos de evaluación (eso sí, el estado

inicial de la red condicionará el número de iteraciones necesario para ello).

Aunque la disponibilidad de los registros meteorológicos no es un requisito explícitamente establecido por las directivas de calidad del aire³, esta información es esencial para la correcta interpretación de la evolución de las concentraciones de contaminantes, para la identificación del origen de estos, que en ocasiones puede estar en CCAAs vecinas o incluso fuera de las fronteras del estado [ref 7], y para otros objetivos establecidos para las redes de vigilancia como la validación de modelos. En consecuencia, habitualmente los manuales para la implementación de las directivas sí recomiendan la medida de variables meteorológicas para la evaluación y gestión de la calidad del aire [ref 8,9].

En **aglomeraciones** hay que considerar también el diseño de las ciudades, que puede tener una gran influencia en la dispersión. Por ejemplo, en las zonas antiguas de la ciudad con calles estrechas, esta dispersión puede estar restringida, por lo que los niveles de concentración de contaminantes pueden ser elevados a pesar de que no se produzcan allí las emisiones más importantes. La realización de campañas con captadores pasivos es de utilidad para identificar las zonas urbanas con diferentes grados de contaminación.

A continuación se describe cada una de las tres fases contempladas en el procedimiento.

€ **Fase 1:** *Distribución geográfica de las emisiones, y análisis sistemático de los datos meteorológicos*

En esta fase se identificarán las principales fuentes de emisión que puedan afectar a la zona (no se precisa disponer del inventario de emisiones detallado), y se recopilarán todos los datos disponibles de torres meteorológicas en la zona a analizar y en zonas vecinas con las que pueda haber una continuidad en las circulaciones de viento más habituales. Las características orográficas de la zona pueden orientar sobre esta posibilidad.

En general las líneas que definen las cadenas montañosas separan cuencas aéreas, y los valles canalizan las circulaciones que transportan la masa aérea. Además se tendrá en cuenta que la orientación geográfica de las cadenas montañosas influye sobre las circulaciones actuando como barreras orográficas, que se oponen o cambian la trayectoria de los vientos de escala general, o

³ Las únicas referencias en la 2002/03/CE son: en el Artículo 10.1.c " (la comisión) verificará periódicamente la aplicación de los planes o programas presentados [...] examinando su progreso y las tendencias de la contaminación atmosférica, teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas y el origen de los precursores de ozono". Y en el Anexo IV.3 se insta a revisar periódicamente los emplazamientos para demostrar que los criterios de selección se siguen cumpliendo "Ello exige la adecuada selección e interpretación de los datos de seguimiento en el contexto de los procesos meteorológicos y fotoquímicos que afecten a las concentraciones de ozono en el emplazamiento de que se trate"

bien definiendo líneas de convergencia de las circulaciones de mesoescala (con mayor efecto sobre las vertientes sur-este donde el mayor grado de insolación induce vientos anabáticos o de valle más intensos).

Será necesario disponer de series temporales que abarquen un periodo suficiente de años (3-5 años como mínimo), para garantizar la representatividad temporal, y con una resolución temporal al menos de datos horarios⁴. Por otro lado, además de contar con datos depurados (si no lo están se requiere un revisión previa para el filtrado de los datos que no presenten una buena calidad), es importante conocer la posición exacta de todas las torres, y la posible influencia de forzamientos locales que puedan distorsionar el comportamiento general de la circulación dentro de una cuenca aérea. Si se trata de torres gestionadas por diferentes organismos, especialmente si no pertenecen a las redes de calidad del aire, es importante conocer detalles como la altura de la veleta, que pueden provocar efectos como el registro velocidades mayores durante el día si se trata de torres con alturas muy superiores a los 15 m que miden las torres de las RACAs, o quedar desacopladas de la circulación en superficie durante la noche cuando están pequeña colinas o en laderas dentro de un valle. Otro ejemplo es la ubicación de torres en cotas elevadas dentro del eje de cadenas montañosas con registros que pueden resultar ambiguos por estar sometidos a la influencia de diferentes vertientes dependiendo de la situación meteorológica o simplemente de la hora del día.

El primer procesado de estos registros meteorológicos consiste en la generación de las **rosas de viento** separando las componentes estacionales, y la componente diurna de la nocturna en cada caso (figura 1.3). Si la densidad de torres es suficiente el análisis de estas rosas permite estimar cual será la continuidad de los vientos, y dará información valiosa sobre las rutas de transporte habitual en la zona y su probable variación estacional.

El cálculo las series diarias de los parámetros S y L (figura 1.4) a partir de los registros de velocidad y dirección del viento ayudará al establecimiento de hipótesis sobre el alcance de esas circulaciones [ref. 10]. Posteriormente la superposición de la orografía a dichas rosas, y un mínimo conocimiento de los forzamientos orográficos que puedan influenciar dichas medidas, permitirá refinar estas hipótesis.

⁴ Será necesario tener garantía de que estos promedios horarios han sido correctamente calculados. En particular, los datos de velocidad y dirección de viento han de tratarse vectorialmente, no como escalares independientes, de manera que los datos horarios de dirección y velocidad correspondan respectivamente a la dirección y a 1/6 del módulo del vector resultante de la suma de los 6 vectores diezminutales.

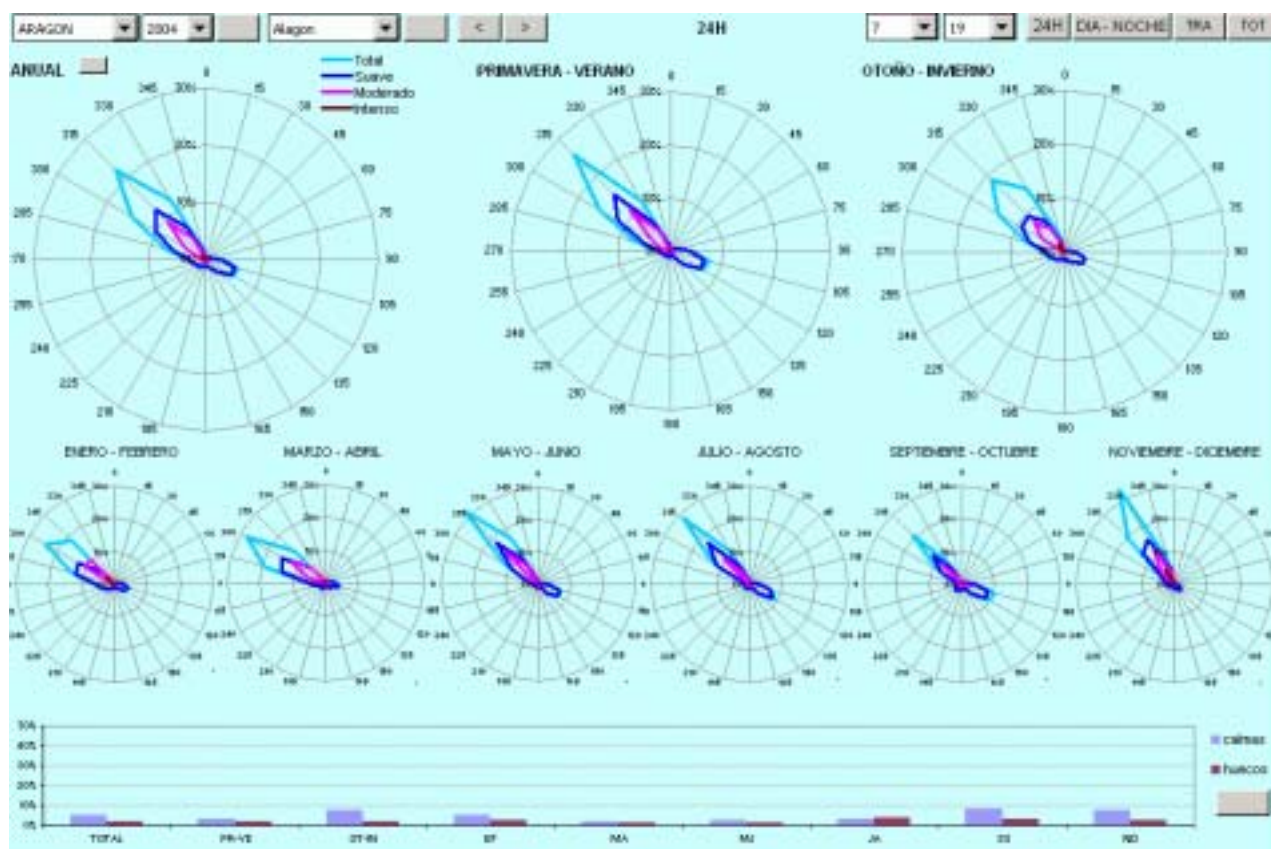
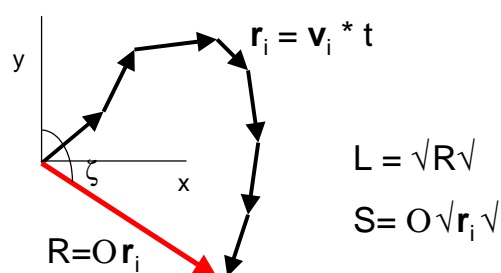


Figura 1.3: Rosas de viento de la estación de Alagón cercana a Zaragoza (año 2004). Es evidente la canalización del valle del Ebro a lo largo de todo el año, con predominio de la componente NW (cierzo).



Índice de recirculación $I_R = 1 - R/S$

$L-S \gg$ advección ($I_R = 0$)

$L, S \ll$ estancamiento

$L \gg S$ oscilación/recirculación ($I_R \downarrow 1$)

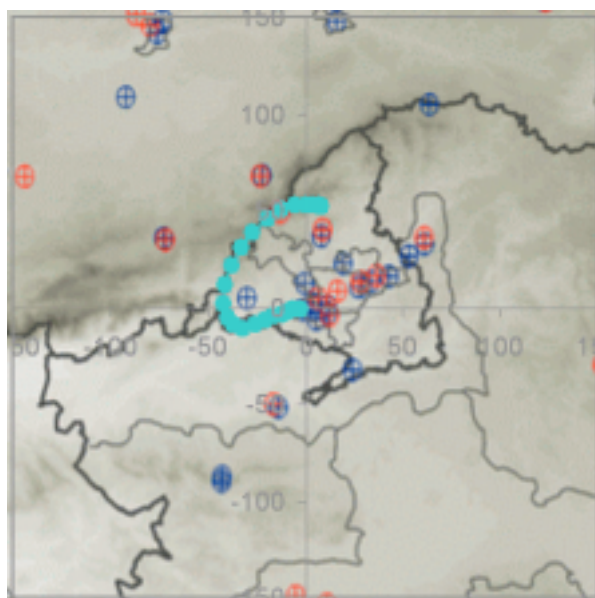


Figura 1.4: (Izquierda) S es el camino recorrido (longitud del arco descrito por los vectores velocidad [$t=1$]), y L la distancia neta recorrida (módulo del vector resultante de la suma de los vectores velocidad [$t=1$]) [ref 10]. (Derecha) Ejemplo de pseudo-trayectoria promedio del mes de Julio de 2004 a partir de datos de la torre de la estación automática de Móstoles. Aún cuando sea calculada para un día en concreto no corresponde a trayectorias reales (en áreas de orografía compleja puede desviarse mucho de estas), pero bien aplicadas pueden dar buena idea del patrón de las circulaciones. Este ejemplo reproduce al menos cualitativamente la dinámica en el área de Madrid en verano.

A continuación la distribución de las **fuentes de emisión** principales (dentro y fuera de la zona), que pueden aportar niveles de contaminantes a la zona, en relación con los campos de viento identificados en el análisis de las rosas de viento, permitirá elaborar las hipótesis en cuanto a las rutas de transporte habitual de estas emisiones.

En este punto hay que tener en cuenta que las rosas procedentes de torres situadas en el entorno de las áreas de emisión identificadas, darán una primera idea de las áreas de influencia (áreas a sotavento) de cada una de ellas dentro de la zona. En particular, para las fuentes de emisión externas a la zona, se podrá confirmar si efectivamente es razonable suponer un impacto dentro de la zona estudiada. Y por su parte, las rosas de torres en otros puntos dentro de la zona permitirán identificar el área (la sombra de barlovento) dentro del cual la presencia de emisiones puede acabar influenciando las concentraciones en dicho punto.

En todo este análisis la mayor o menor densidad de torres meteorológicas disponibles permitirá un mayor o menor reconocimiento de la continuidad de las circulaciones, y en consecuencia una mayor o menor precisión en el reconocimiento de las rutas de transporte habitual de la masa aérea dentro de la zona. En este sentido es importante intentar acceder a otras redes meteorológicas que complementen las propias torres de la red de calidad del aire.

€ **Fase 2:** *Análisis conjunto de los datos meteorológicos y los datos de calidad del aire.*

En esta segunda fase se añaden los datos de concentraciones de contaminantes. El contraste de estos datos frente a las hipótesis planteadas en la fase anterior respecto a las rutas habituales de transporte de la masa aérea dentro de la zona, y la variabilidad espacial esperable en base a esta dinámica, permitirá confirmar o no dichas hipótesis. Las claves más importantes para la interpretación de los datos de concentración junto a las variables meteorológicas se recogen en el apartado 2.1.

Además, puesto que criterio para la delimitación de las zonas es el de abarcar áreas de calidad del aire equivalente, y teniendo en cuenta la interpretación adoptada de este concepto que se explica en la introducción, se procesarán los datos de contaminantes para el cálculo de las superaciones de valores límite y valores objetivo.

La revisión de toda esta información permitirá una primera valoración en cuanto a lo adecuado del diseño de la zona y de la distribución de los emplazamientos de medida. Como resultado de este análisis conjunto se abren diferentes posibilidades:

- 1) El análisis de los datos meteorológicos y de concentración junto con la distribución de emisiones identificadas es **autoconsistente** (i.e., la variabilidad espacio-temporal de las concentraciones es coherente con la dinámica de transporte y dispersión de las emisiones identificadas a partir de los registros meteorológicos), y es **completo** (i.e., los resultados del análisis se pueden extender a todo el territorio abarcado por la zona y en todas las estaciones del año). En este caso tenemos dos posibles conclusiones:
 - a) la zona presenta niveles equivalentes de calidad del aire en todo su territorio, y los emplazamientos de medida en ella ubicados son adecuados a los criterios de evaluación por ser representativos de toda la zona.
 - b) Los datos de concentración disponibles muestran que la zona comprende un área donde la calidad del aire no es equivalente en toda su extensión.
- 2) El análisis de los datos meteorológicos y de concentración junto con la distribución de emisiones identificadas es **autoconsistente**, pero **no es completo** (i.e., los resultados del análisis no se pueden extender a todo el territorio abarcado por la zona, existen "huecos" o áreas significativas no caracterizadas en cuanto a las concentraciones que le afectan).
- 3) El análisis de los datos meteorológicos y de concentración junto con la distribución de emisiones identificadas **no es autoconsistente** (i.e., la variabilidad espacio-temporal de las concentraciones no es coherente con la dinámica de transporte y dispersión que sugieren los registros meteorológicos)

≠ **Fase 3: Propuesta de optimización.**

En el mejor de los casos, 1A, solo se requiere alguna propuesta de optimización si se identifica la existencia de redundancias entre diferentes cabinas. En ese caso se propondría "liberar" alguno de los monitores o cabinas redundantes que quedará disponible para cubrir posibles huecos. El caso 1B implica directamente una propuesta de optimización consistente en modificar la delimitación geográfica de la zona analizada, y si es necesario de las zonas vecinas.

El caso 2 supone que se ha identificado algún hueco en la cobertura espacial de la red. Esto puede llevar directamente a una propuesta de optimización, como la instalación de una nueva cabina en esa área, o la reubicación de una estación considerada no representativa o redundante. Cuando no sea posible determinar el punto de medida idóneo se requerirá información complementaria, que en primera instancia puede cubrirse con campañas de medida con las unidades móviles en los puntos y periodos adecuados (ver apartado 3.1.1).

En el caso 3, para descartar errores en la aplicación del procedimiento, será necesaria la revisión de la calidad de los datos, y de las hipótesis de partida en cuanto a rutas de transporte y fuentes de emisión identificadas. Si en esta revisión no se encuentra la causa de la incoherencia entre toda la información analizada, será necesario recurrir a herramientas y datos adicionales que puedan mejorar el conocimiento de la situación. Se trata por tanto de planificar campañas experimentales o ejercicios de modelización meteorológica y fotoquímica, que puedan aportar mayor información.

Estas herramientas y los criterios para su aplicación sobrepasan seguramente la capacidad técnica de los gestores de la calidad del aire. Para abordar estas tareas será necesario recurrir a grupos científicos especializados (ver apartado 4.2). En caso de que estas tareas se lleguen a realizar sus resultados permitirán retomar de nuevo el procedimiento de optimización con información adicional que puede sacarnos de este bucle.

1.2. REPRESENTATIVIDAD DE EMPLAZAMIENTOS.

Cualquier emplazamiento es representativo de la calidad del aire en la medida en que allí se refleja el efecto de una combinación determinada de los factores que intervienen en el proceso *emisión-transporte/dispersión-transformaciones fotoquímicas* que siguen los contaminantes. Por tanto a priori tendría interés la medida en continuo en cualquier punto, siempre que seamos capaces de interpretar las concentraciones registradas en función de dichos factores.

Pero en el contexto de la evaluación de la calidad del aire, según los criterios establecidos en las directivas, la cuestión es si la calidad del aire en un punto es representativa de un área más o menos extensa, y en definitiva cuantos puntos de medida necesitamos como mínimo para "capturar" adecuadamente la variabilidad espacio-temporal de los contaminantes en un territorio. Todo ello por supuesto siguiendo el principio de mayor rentabilidad, es decir, conseguir un conocimiento adecuado de la situación con la menor cantidad posible de recursos.

El objetivo es determinar cual es el área de representatividad de una estación, y si esta abarca toda la zona donde está o solo parte de ella. En este punto se requiere una definición previa del concepto de *área de representatividad* de una cabina en el contexto de los criterios de evaluación que marcan la directivas. De otra manera será difícil salir del debate de cuanto han de parecerse las concentraciones entre dos puntos para que se puedan considerar equivalentes (y que por tanto la medida en uno de ellos sea representativa de lo que ocurre en el otro), y a que promedios nos referimos cuando comparamos ambas.

Siguiendo una línea de argumentación coherente con el criterio de delimitación de zonas señalado en la introducción, una cabina representa un determinado área si se cumplen dos condiciones :

- ≠ Condición 1: La calidad del aire en todos los puntos del área es equivalente en el sentido en que todos los puntos se clasificarían en el mismo intervalo dentro de los que definen los parámetros de calidad establecidos en la legislación. Esto es, por debajo o por encima de los valores límite/objetivo, y a poder ser también por encima, por debajo o entre los umbrales de evaluación superior e inferior.
- ≠ Condición 2: Dicho área está incluida dentro de una misma cuenca aérea (entendida como un área geográfica en la cual los niveles de contaminantes están influidos fundamentalmente por las mismas fuentes y por los mismos procesos de transporte de la masa aérea desde dichas fuentes). Es decir, hay unas relaciones causa-efecto identificadas y compartidas para todo el área.

La primera condición no es otra cosa que la relación de área de representatividad con la interpretación general de zona como área donde todos sus puntos tienen una calidad del aire equivalente, y definiendo claramente que es lo que consideramos calidad del aire equivalente / niveles similares / niveles homogéneos (por citar los tres términos que habitualmente se manejan cuando se ha abordado este tema).

En este punto la consideración de otros niveles de referencia además de valores límite, objetivo y umbrales de evaluación, como los umbrales de información y alerta, refina la clasificación aún más, y proporciona un criterio más exigente en relación con la representatividad. Esta ampliación supondrá en principio la necesidad de un mayor número de emplazamientos de medida en una zona, y es muy recomendable en relación con los requisitos de información a la población que establecen las directivas, para delimitar el territorio dentro de una zona en el que se está produciendo la superación de estos umbrales (sin embargo no es aplicable a la definición de calidad del aire equivalente pues estos parámetros legales están relacionados con situaciones episódicas, y no son tan adecuados como los valores objetivo para la caracterización de la calidad del aire en los términos de la evaluación anual. Por eso no se consideran en la definición de calidad del aire equivalente adoptada. En todo caso, si las situaciones episódicas son muy frecuentes, el efecto se traducirá en superaciones de valores límite y objetivo).

La segunda condición es una regla general, que admitiría excepciones siempre que estén debidamente justificadas (las directivas contemplan la posibilidad de evaluar una zona a partir de las medidas de una estación situada en una zona diferente). Por ejemplo esta posibilidad puede

ser adecuada, y no siempre, únicamente para vigilar (incluso juntar en una sola zona) núcleos urbanos medianos dispersos. En ellos el factor principal que determina la calidad del aire son las emisiones de tráfico, cuyas pautas son similares en todas las ciudades. En cualquier caso la suposición de que todos ellos tienen una calidad del aire equivalente habría de ser confirmada.

1.2.1. Ubicación de estaciones. Criterios de macro y microimplantación.

En la selección de los puntos de medida se tendrán en cuenta los criterios de macro y microimplantación establecidos en la legislación (Anexo 6 D.1999/30/CE, Anexo 4 D.2000/69/CE y Anexo 4 D.2002/03/CE).

Para la evaluación de SO₂, NO_x, PM₁₀ y PM_{2.5}, Plomo, CO y Benceno estos criterios han sido llevados a la nueva propuesta de directiva de calidad del aire con ligeras modificaciones, como distinguir según sea el objetivo la protección a la salud humana o la protección a la vegetación (Anexo 3 versión 21 Junio2006). Así, se especifica que los emplazamientos cuyo objetivo es la protección de la salud deben localizarse en:

- ≠ En áreas de las zonas y aglomeraciones con las concentraciones más elevadas donde la población puede estar expuesta de manera directa o indirecta por periodos significativos en la relación con el periodo de promedio del valor límite.
- § En áreas en zonas y aglomeraciones que son representativas de la exposición de la población en general.
- § Las estaciones de tráfico deben ser representativas de la calidad del aire en un segmento de la calle no inferiores a 100m y las industriales de un área de 250 x 250m.
- § Las estaciones de fondo urbano deben ser ubicadas de manera que estén influenciadas por la contribución integrada de todas las fuentes localizadas a barlovento de la estación.
- § Las estaciones de fondo rural no deben estar influenciadas por las emisiones de aglomeraciones o industriales próximas (menos de 5 Km.).
- § Cuando se han de evaluar las contribuciones de los focos industriales, al menos uno de los emplazamientos de medida debe situarse a sotavento, en la zona residencial más próxima. Además, cuando no se conozcan los valores de fondo también se ha de ubicar una cabina en la dirección principal del viento.

Y los puntos de medida dirigidos a la protección a la vegetación y ecosistemas naturales:

- § En general, estarán situados a más de 20 Km. de las aglomeraciones y a más de 5 km de otras áreas edificadas, instalaciones industriales, autopistas, o vías de tráfico importante (más de 50000 vehículos por día)

En el caso del ozono la propuesta de directiva (Anexo 8, ver. 21 Junio 2006) no modifica los criterios respecto a la 2002/3/CE (Anexo 4), y sigue figurando la misma tabla para estaciones urbanas, suburbanas, rurales o rurales de fondo. Hay que subrayar que esta tabla considera las estaciones suburbanas solo en aglomeraciones, dando a entender implícitamente que no son apropiadas en zonas de tipo no aglomeración. Sin embargo se contradice con la tabla del Anexo 5 (Anexo 9 en la directiva propuesta ver. 21 Junio 2006), donde se especifica el número mínimo de estaciones por zona, y donde sí se consideran las estaciones suburbanas en zonas no aglomeración.

1.2.1.1. Ubicación de estaciones automáticas en las zonas de tipo no aglomeración.

Rigurosamente, tal como se han definido/acotado los conceptos de *zona*, *calidad del aire equivalente* y *área de representatividad*, se asume implícitamente que de seguir el criterio de zonificación propuesto, puesto que cada zona tiene una calidad del aire equivalente en todos sus puntos, basta con una sola estación ubicada en cualquier punto de la zona para garantizar su correcta vigilancia. Obviamente en la práctica esto no sucederá nunca. Dentro de cada zona existirá siempre un numero indeterminado de puntos donde efectos de escala local pueden proporcionar registros poco representativos de la zona en general (por estar muy influenciados por determinadas fuentes de emisión o, por existir restricciones o alteraciones en las circulaciones de viento debido a pantallas naturales o artificiales). La selección de emplazamientos adecuados de medida consistirá fundamentalmente en evitar estos puntos.

Por otro lado, los amplios rangos en los que, bajo el criterio de zonificación propuesto, pueden variar las concentraciones dentro de una zona, ya sea por debajo o por encima de los valores límite y valores objetivo, aconsejarán en ocasiones la medida en más de un punto para "capturar" adecuadamente la variabilidad espacial de las concentraciones dentro de la zona. Esto es especialmente importante para vigilar las áreas con mayor frecuencia de superaciones de los umbrales de información y de alerta. Aunque estas superaciones no tienen efecto directo sobre la evaluación anual, sí lo tienen en la ejecución de planes de actuación a corto plazo (Ap.3 Art.7 1996/62/CE, y Ap.1 Art. 7 2002/03/CE), y en la obligación de informar a la población sobre estas

superaciones (por eso la matización de la *Condición 1a* al principio del apartado respecto al uso de los umbrales de información y alerta en la definición de área de representatividad).

Para todo ello es importante tener en cuenta la distancia y la posición relativa del punto de medida respecto a focos de emisión importantes, grandes núcleos urbanos e industriales. En general, las concentraciones de los compuestos primarios allí emitidos (NO_x , SO_2 , CO) se reducirán rápidamente (también a sotavento), con la distancia a estas emisiones a causa de las reacciones químicas que transforman estos productos en otras especies secundarias. Estas últimas sin embargo, que se forman dentro del penacho a lo largo del transporte de la masa aérea, se mantendrán elevadas, e incluso crecerán a sotavento de las fuentes (figura 1.5). Para estos contaminantes, como el ozono, las emisiones de estas fuentes pueden traducirse en niveles máximos, por encima del umbral de información y alerta, a distancias en el rango de 20-60 km. a sotavento de las fuentes, donde se da el tránsito entre la región limitada en VOCs y la región limitada en NO_x ⁵ [ref 11,12].

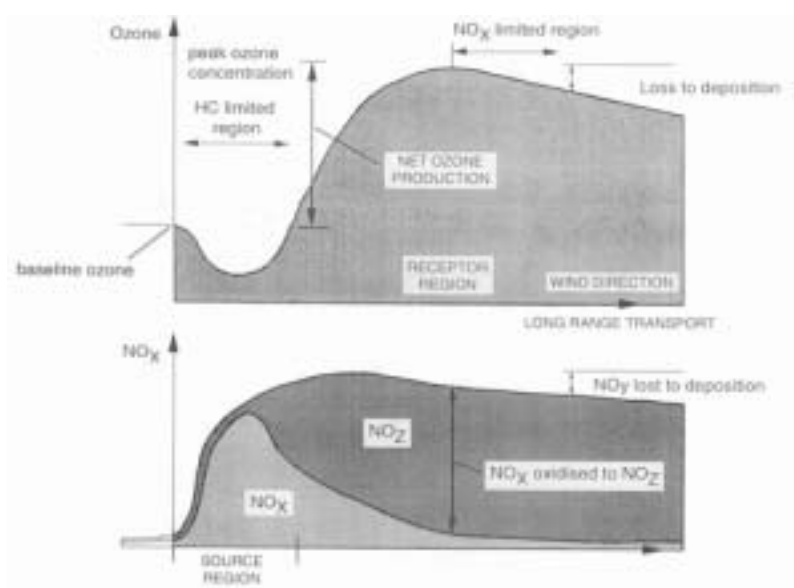


Figura 1.5: Esquema de formación de ozono y otros productos secundarios a sotavento de una fuente de emisión de NO_x (fuente: Derwent & Davies, 1994) [ref 11]

La figura 2.2 en el siguiente capítulo es una extensión del esquema mostrado en la figura 1.5 a un escenario típico en la costa mediterránea en el que además la altura sobre el nivel del mar es también determinante en los niveles de ozono, especialmente en los niveles nocturnos.

1.2.1.2. Ubicación de estaciones automáticas en las aglomeraciones.

La evaluación preliminar de los datos suministrados por los estados miembros a la comisión ponen de manifiesto que la evaluación de la calidad del aire en las aglomeraciones se lleva a cabo bajo diferentes criterios. Por tanto no siempre se obtiene la necesaria consistencia, coherencia y comparabilidad entre los datos de diferentes redes de control y países, por lo que es necesario armonizar las redes de medida de la calidad del aire.

Determinados países han preferido medir en zonas de **fondo urbano** mientras que otros se han decantado por controlar las zonas de mayor contaminación (estaciones de proximidad o **hotspots**). Esto se ha traducido en estrategias de medida y control muy dispares con resultados difícil de comparar entre sí. Por ejemplo, en el Reino Unido la ratio de estaciones de fondo/hotspots es de 6.8 mientras que en España es de 0.5⁶ aproximadamente. En esta situación es difícil establecer una valoración adecuada y comparable de la exposición a la contaminación atmosférica en Reino Unido y España. En el primer caso, las medidas realizadas son un reflejo de los niveles de fondo a los que estaría sometida un alto porcentaje de la población, mientras que en el segundo indican los valores máximos de contaminación a los que puede estar sometida la población, aunque sea representativo de la exposición de un porcentaje bajo de esta.

Como se ha comentado anteriormente, a partir del establecimiento de las directivas europeas se pone de manifiesto que un objetivo de las medidas es la mejora del conocimiento de la exposición de la población a los contaminantes. Por tanto es necesario intensificar las medidas de fondo urbano, pero hay que seguir midiendo en situaciones de “hot spot”. Hasta ahora, la directiva no establece cual debe ser el ratio fondo/hotspots, aunque teniendo en cuenta las diferentes estrategias llevadas a cabo por los países miembros parece que una ratio 60/40 sería el más adecuado.

En todo caso esta ratio es solo orientativa, y también en el caso de las aglomeraciones habrá que tener en cuenta las peculiaridades geográficas en relación con la distribución y tamaño de las áreas urbanas, y la propia configuración de las ciudades, que siguen modelos diferentes entre el norte y el sur de Europa.

⁵ La región limitada en VOCx es el área donde abunda el NOx (áreas de emisión) y el potencial de formación de ozono está limitada por la cantidad de VOCx, y la región limitada en NOx es donde el NOx en principio disponible ya ha sido transformado a lo largo del transporte y se acaba la formación neta de ozono.

⁶ Datos calculado en 2005 sin considerar las estaciones rurales.

En el Anexo V de la nueva propuesta de Directiva se especifica que, en el caso de fuentes difusas, para la media de NOx, PM, CO y benceno el número total de estaciones de fondo urbano y de estaciones orientadas al tráfico no debe diferir en un factor superior a 2. Es importante tener en cuenta que, tal como se especifica en esta nueva propuesta, aquellos puntos de muestreo donde se haya superado el valor límite de PM10 en los últimos tres años deberán mantenerse.

Por otra parte, hay que considerar que en la nueva propuesta de Directiva también se especifica que cuando se mide PM10 y PM2.5 en una misma ubicación hay que considerarlos como si se tratará de dos ubicaciones distintas. En este caso, el número total de puntos de medida de PM10 y de PM2.5 no debe diferir en un factor superior a 2.

1.2.1.3. Ubicación de estaciones automáticas para el descuento de superaciones naturales.

Para realizar el descuento de superaciones de PM10 atribuibles a episodios naturales de aporte de polvo mineral desde el norte de África, es necesario disponer en cada zona de estaciones de fondo regional de vigilancia de calidad del aire donde se registren los niveles de PM con equipos automáticos y/o manuales, de modo que se pueden disponer de los datos en tiempo cuasi real y se puedan validar, y en su caso corregir, los datos con posterioridad. Las estaciones a utilizar, algunas de las cuales ya han sido seleccionadas por el DGCEA-MMA, las CCAA, el CSIC y el INM deben de tener características similares a las estaciones de la red EMEP-CAMP-VAG.

Se deben elegir sitios representativos respecto a la exposición a las masas de aire provenientes de Africa. Para ello se deben evitar los valles o otras localizaciones susceptibles de que se desarrollen estancamientos de las masas de aire. Lo ideal son emplazamientos en zonas bien expuestas, en un terreno ligeramente ondulado, evitando el fondo de los valles, puertos de montaña o zonas costeras. La red EMEP establece que estas estaciones deben estar ubicadas a una distancia superior a 50 km. de los grandes focos de emisión (ciudades, plantas de producción de energía eléctrica, autopistas,..) y a más de 500 m de carreteras principales con un tráfico inferior a 5400 vehículos/día.

2. INTERPRETACIÓN DE DATOS DE LAS REDES AUTOMÁTICAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE.

El análisis e interpretación de los datos de calidad del aire requiere el conocimiento de los factores que determinan la variabilidad espacio-temporal de las concentraciones de contaminantes, y también la disponibilidad de herramientas adecuadas para la representación de las series de datos, de manera que las relaciones causa-efecto que conectan estos procesos con los niveles de concentración registrados puedan ser identificadas.

En este capítulo se abordan ambos aspectos tratando de explicar, por un lado, cuales son estos factores y como se manifiestan en nuestro ámbito geográfico, y por otro, mostrando ejemplos gráficos apropiados que ilustran estas relaciones causa-efecto y su variabilidad espacio-temporal dentro del territorio.

En general las concentraciones de cualquier contaminante en un punto de la superficie responden en cada momento al balance entre diferentes **procesos** de aporte y eliminación o destrucción de las especies químicas involucradas (figura 2.1). Entre los procesos de **aporte** se cuentan: 1) las emisiones primarias desde fuentes naturales y antropogénicas, 2) la formación "in situ" de compuestos secundarios como resultado de las transformaciones químicas que tienen lugar en la atmósfera (muchas de ellas activada por la energía de la radiación solar), y 3) el aporte de contaminantes desde las parcelas vecinas a causa del transporte que ejercen los movimientos de aire, tanto en la dimensión horizontal como en la vertical (ej., fumigación desde capas altas). En cuanto a los procesos de **eliminación o destrucción** los más importantes son: 1) las reacciones químicas, que implican la formación de compuestos secundarios a partir de otros compuestos primarios y secundarios que desaparecen, 2) los procesos de deposición seca y húmeda sobre la superficie, y 3) el transporte de contaminantes fuera de la parcela de aire a causa de los movimientos atmosféricos, tanto en la dimensión horizontal (advección), como en la vertical (turbulencia mecánica y/o convectiva, e inyección/transporte vertical por interacción entre masas aéreas o por forzamiento orográfico).

Además de todo ello las concentraciones pueden variar como respuesta a cambios en la profundidad de la capa de mezcla (la capa de la atmósfera en contacto con la superficie donde la turbulencia térmica y mecánica inducida por este contacto mantiene la composición del aire relativamente homogénea). La reducción de esta altura de la capa de mezcla, como ocurre bajo situaciones de inversión térmica, puede incrementar significativamente las concentraciones al reducir el volumen de mezcla.

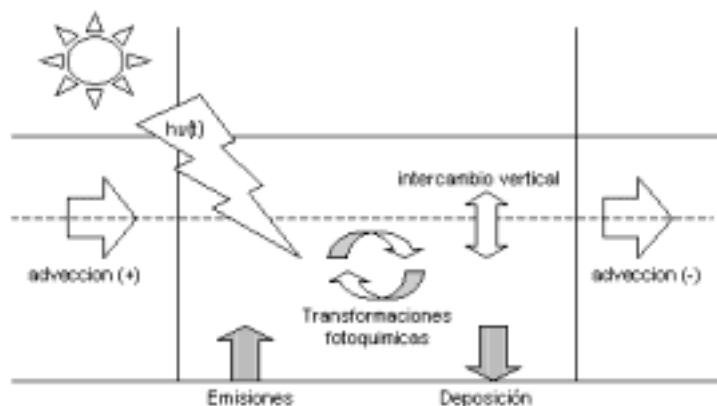


Figura 2.1: Factores que determinan las concentraciones sobre la superficie.

Estos procesos ocurren en todas las **escalas** desde la microescala a la escala general o sinóptica, pasando por la escala local y la mesoescala o escala regional, y todos ellos se superponen entre sí en cada punto de la superficie, predominando unos sobre otros dependiendo de la época del año, las condiciones atmosféricas dominantes y la situación geográfica del punto considerado.

Esta posición geográfica implica unos condicionantes climáticos, meteorológicos y orográficos que influyen decisivamente sobre la forma en que se manifiestan los anteriores procesos, e implica también una posición relativa respecto a las fuentes de emisión que determinan las condiciones iniciales (p.e. si se trata de un punto situado en un entorno de emisiones o alejado de estas, y en este caso, si se encuentra o no a sotavento de ellas, y a que distancia, implica también situaciones diferentes).

Como resultado de todo ello las concentraciones de contaminantes a nivel de superficie siguen **pautas espacio-temporales características**, que son registradas por las redes automáticas de control de la calidad del aire. En las series de datos registrados por estas redes las **componentes periódicas** (estacionalidad, ciclo semanal, ciclo diario) se manifiestan regularmente, y las **no periódicas**, debidas fundamentalmente a periodos transitorios y/o condiciones meteorológicas cambiantes, se suman a las anteriores provocando el incremento o la reducción respecto a los niveles habituales (entendidos estos como niveles promedio para un punto y una fecha del año).

La interpretación de estos datos no es sencilla, entre otras cosas porque es difícil separar unas componentes de otras, y porque estas redes solo proporcionan información de variaciones a nivel de superficie que están provocadas en gran medida por procesos que ocurren también en altura.

En el caso de la península ibérica, a diferencia del centro y norte de Europa, los condicionantes meteorológicos están muy marcados por los procesos en la **mesoescala**, especialmente en los

meses de primavera y verano cuando las condiciones anticiclónicas propician situaciones de estabilidad atmosférica y predominio de las circulaciones de origen térmico, con ciclos diarios alternantes día-noche como las brisas de mar o los vientos de ladera/valle.

Estas circulaciones provocan el transporte de la masa aérea dentro de áreas delimitadas por la orografía (cuencas aéreas), y a ellas se asocian también mecanismos de inyección vertical y generación de estratos de contaminantes en altura durante el día. Estos estratos con frecuencia acaban impactando de nuevo sobre la superficie a la mañana siguiente con el desarrollo de la capa de mezcla, y la consecuente fumigación e impacto de estos contaminantes "envejecidos" sobre la superficie en el mismo área o en otros puntos alejados (esto segundo puede ocurrir con viento suave en la capa residual nocturna que transporta estos estratos a distancias largas manteniendo su estructura).

Esta dinámica supone una limitación espacial de la masa aérea que favorece la ocurrencia de periodos de acumulación de contaminantes a lo largo de varios días.

Por ejemplo en la vertiente mediterránea, una de las regiones de Europa donde más se ha estudiado la dinámica de contaminantes [ref 4,5], se han caracterizado periodos típicos entre 3 y 9 días en que se produce una recarga gradual en los niveles de ozono, con máximos diarios crecientes que acaban a menudo en la superación del umbral de información establecido en la directiva europea 2002/03/CE ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio horario) [ref. 13,14]. Estos periodos están asociados a fenómenos de recirculación de la masa aérea dentro de un circuito que comienza a primera hora de la mañana con el transporte de las emisiones costeras hacia el interior dentro de las circulaciones de brisa (figura 2.2). En el camino, el frente de brisa eleva porciones de contaminantes que viajan con la masa aérea transportada, dentro de la cual las reacciones químicas van transformando las emisiones originales en otros productos secundarios. A lo largo del trayecto la circulación de brisa se refuerza progresivamente al acoplarse con los vientos anabáticos o brisas de valle, y al alcanzar las cadenas montañosas paralelas a la costa el ascenso sobre estas se ve reforzado hacia arriba (este proceso se denomina "inyección orográfica"), dando lugar a la formación de estratos de contaminantes a mayor altura. Una vez desacoplados de la circulación en superficie todos estos estratos viajan con la circulación de retorno de nuevo en dirección hacia el mar, donde descienden forzados por la subsidencia compensatoria. El resultado es una colección de estratos de reserva "apilados" a última hora del día sobre la costa, y disponibles para entrar con la brisa a la mañana siguiente sumándose a las emisiones recientes, y repitiendo de nuevo el ciclo anterior.

Durante la noche, el aire en contacto con la superficie se enfría y desciende por las laderas hacia las zonas más bajas siguiendo los canales naturales (drenaje nocturno), y se une en la costa con las brisas nocturnas o de tierra, que circulan ahora en dirección hacia el mar. En estas horas en que cesa la producción fotoquímica la altitud marca diferencias en los niveles de ozono, con concentraciones progresivamente más reducidas a lo largo del recorrido a causa del contacto con el terreno (deposición) y con emisiones residuales que consumen el ozono, mientras que en puntos elevados, fuera de esa influencia y en muchos casos en contacto con los estratos en altura, los niveles se mantienen similares o ligeramente inferiores a los registrados durante el día (ver figura 2.4 más adelante)

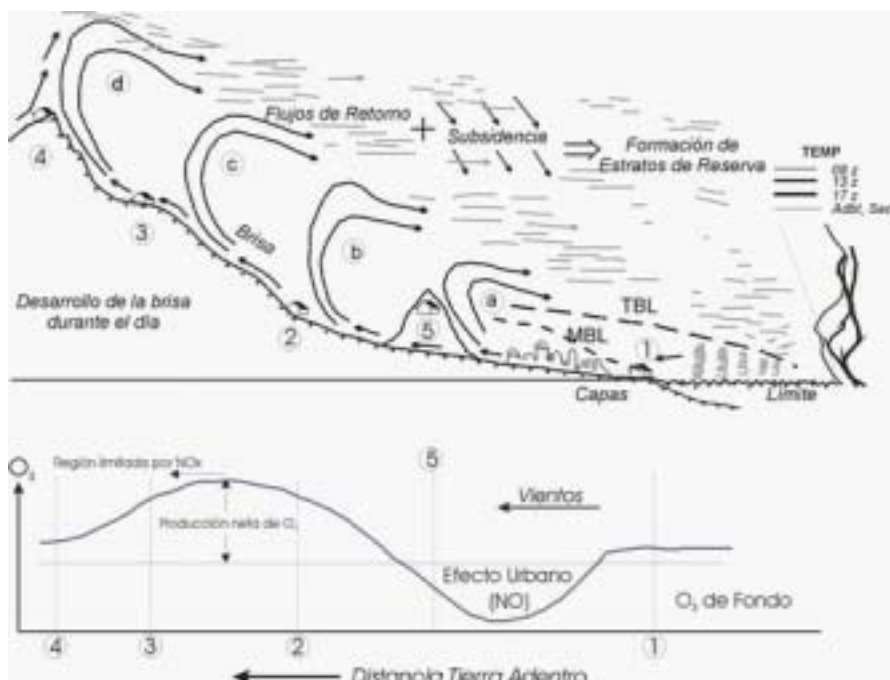


Figura 2.2: Escenario típico de transporte de las emisiones costeras en la vertiente mediterránea. La numeración 1-5 corresponde a cinco posiciones dentro de la cuenca aérea para las cuales se han caracterizado 5 ciclos de ozono (Fuente: Millán et al., 2000)[Ref 13]

Existen también otras áreas de la geografía española en los que se dan condiciones especialmente adversas para la dispersión de contaminantes, como ciertas áreas de interior, cuencas cerradas en los valles de los ríos o marcadas por la orografía, y donde la presencia de focos importantes de emisión puede dar lugar a concentraciones elevadas sin necesidad de un periodo largo de acumulación previo. Son por ejemplo algunas zonas del valle del Duero y la meseta castellana, caracterizados por su alta frecuencia de formación de nieblas, donde la fuerte estabilidad atmosférica en el periodo invernal, inhibe todo tipo de transporte en situaciones anticiclónicas. En general en invierno son también las situaciones anticiclónicas las que propician

el estancamiento de la masa aérea que puede dar lugar a episodios fundamentalmente de NO₂ y partículas en las grandes capitales.

Las situaciones más desfavorables son aquellas en las que se unen una configuración orográfica compleja y la presencia de grandes focos emisores, como núcleos urbanos o focos puntuales industriales (ver ejemplos en el apartado 2.1.3).

Un ejemplo paradigmático son las elevadas concentraciones registradas en Puertollano, en ocasiones incluso durante el invierno, debido a la abundancia de emisiones industriales en una zona con unas condiciones geográficas y orográficas que favorecen el estancamiento y los fenómenos de inversión térmica, que reducen drásticamente las posibilidades de dispersión. En esta zona son habituales las superaciones de SO₂ y ozono a primera hora de la mañana cuando el calentamiento del terreno comienza a formar la capa de mezcla y acaba por bajar a la superficie los estratos de contaminantes que durante la noche quedan almacenados en la capa residual nocturna (fumigación).

Por último la cercanía geográfica al norte de Africa nos sitúa bajo el área de influencia de las intrusiones de los desiertos del Sahara y Sahel que llegan cargadas de partículas y que ocurren bajo patrones meteorológicos conocidos.

En el apartado 2.1. se muestran diversos ejemplos de series de concentraciones de contaminantes para ilustrar la variabilidad espacio-temporal. En primer lugar se abordan los ciclos determinados por las **componentes periódicas**: ciclos diario, semanal y estacional, y a continuación los patrones de evolución correspondientes a las **componentes no periódicas**, variabilidad meteorológica, con ejemplos que ilustran la dependencia de esta evolución respecto de las variables meteorológicas (dirección y velocidad del viento, radiación, etc.), centrándose finalmente en aquellas situaciones que propician la ocurrencia de **episodios** de contaminación. En cada caso se explican los factores principales que determinan la evolución de las concentraciones, de manera que el conjunto proporcione las claves más importantes para la interpretación de una serie de datos en continuo.

Además para la correcta interpretación de los datos es preciso que todos los ficheros de datos guarden la necesaria coherencia en cuanto a formatos, criterios de agregación en el cálculo de promedios, y criterios de asignación horaria. Para ello el apartado 2.2. establece las normas que deberían regir para todas las bases de datos de las diferentes CCAAs.

2.1. ANÁLISIS DE DATOS Y REPRESENTACIÓN ADECUADA DE LAS SERIES TEMPORALES.

De entre los contaminantes considerados en la legislación, este apartado se centra en los óxidos de nitrógeno (NO_x), como representativo de los compuestos primarios⁷, y el ozono (O_3) como representativo de los secundarios. Estos contaminantes, de los que se registran niveles elevados en todas las redes automáticas de España, están ligados por una cadena de reacciones químicas que determinan sus concentraciones y su variación conjunta.

En atmósferas donde ambos están presentes, como en áreas urbanas, el ozono se forma rápidamente en presencia de radiación solar a partir de la fotodisociación del NO_2 , pero se destruye también rápidamente al reaccionar con el NO emitido por el tráfico de forma continua. Esta situación de equilibrio dinámico mantiene los niveles de O_3 moderados o bajos en atmósferas urbanas. La presencia de otros oxidantes en proporciones suficientes, como los radicales libres que se producen en las cadenas de degradación de los COVs (compuestos orgánicos volátiles) o en la oxidación del propio CO , pueden contribuir a oxidar el NO sin gasto de O_3 , con la formación neta de ozono y el consecuente aumento de los niveles. Esto es lo que ocurre en áreas a sotavento de las emisiones urbanas donde la masa de aire inicialmente rica en emisiones primarias termina transformándose en aire con niveles despreciables de NO_x , pero con altas concentraciones de productos secundarios como el ozono (siguiendo el esquema de la figura 1.5).

Por otro lado la diferencia importante en el tiempo de residencia de ambos compuestos en la atmósfera, la de los NO_x muy reducida en comparación con la del O_3 (alejado de las emisiones frescas pasa a ser un compuesto relativamente estable), supone también diferencias importantes en la distribución espacial y en los patrones de evolución temporal. Los patrones de NO_x están muy ligados al ritmo o pautas de emisión fundamentalmente de fuentes antropogénicas, y se identifican más claramente en el entorno próximo de estas fuentes ya que sus niveles, sobretudo los del NO , se reducen rápidamente cuando nos alejamos de estas. En el caso del ozono la complejidad aumenta debido a que su mayor tiempo de residencia permite entrar en juego procesos propios de escalas mas grandes, y por tanto los patrones abarcan rangos temporales y espaciales más amplios. El primero es por tanto un contaminante de ámbito eminentemente local y el segundo es un contaminante a escala local y regional (y también a escala global por su

⁷ Los NO_x incluyen NO y NO_2 . De ellos solo el primero es rigurosamente primario, el NO_2 es mixto en el sentido de que una pequeña parte es directamente emitida desde sus fuentes (la relación aproximada de NO_x que emite un tubo de escape es 90% de NO frente a 10% de NO_2), pero la mayor parte se forma posteriormente a partir de la oxidación de NO por los oxidantes presentes en la atmósfera (ozono o los radicales libres producto de las cadenas de degradación de los hidrocarburos). Sin embargo, la velocidad de formación del NO_2 en las áreas de emisión es del orden de pocos

impacto en el cambio climático dado el carácter de gas de efecto invernadero del ozono troposférico).

2.1.1. Caracterización de patrones espacio-temporales de las concentraciones y las variables meteorológicas.

a) Ciclo diario.

En **áreas urbanas** las pautas de evolución diaria de las concentraciones de contaminantes varían poco desde el punto de vista cualitativo entre diferentes ciudades. Las diferencias cuantitativas pueden ser importantes y estarán asociadas al tamaño de la ciudad, pero también a la ubicación del punto de medida dentro de esta (proximidad a la vía y a cruces, cantidad de tráfico, anchura, orientación y altura de los edificios, etc.). En estas áreas las variaciones en la intensidad del tráfico a lo largo del día junto con las reacciones químicas explican en gran medida el típico ciclo diario que muestra la figura 2.2.

Estación Urbana : Día Promedio 1999-2005

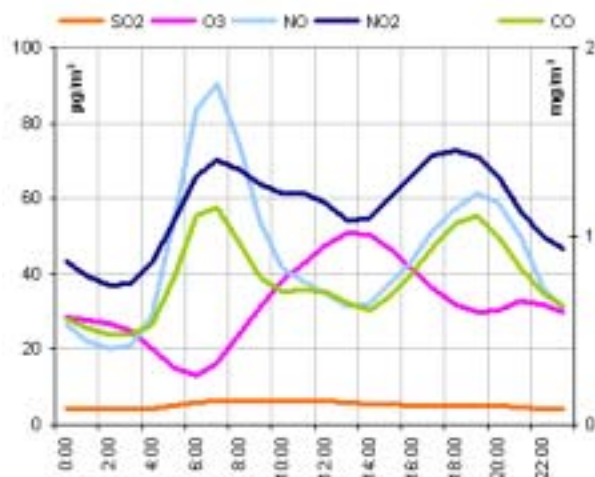


Figura 2.2: Día promedio en la estación de Pista de Silla en Valencia en el periodo 1999-2005 (valores horarios en UTC)

A primera hora las concentraciones de NO_x y CO comienzan a crecer con el aumento del tráfico, alcanzando el valor máximo en torno a las 6-7 h (UTC). En ese momento la menor tasa de emisión de NO_2 hace que este aumente de forma más suave que el NO. A la vez el O_3 residual de la noche se consume en las reacciones de oxidación con el NO dando lugar a la formación de NO_2 . Por tanto en la hora punta de la mañana se registra un máximo de NO_x y un mínimo simultaneo de O_3 . Mas tarde a mediodía el descenso del tráfico se traduce en un mínimo relativo de NO_x , y un máximo de ozono simultaneo (en ese momento coinciden la reducción de emisiones,

segundos por lo que se habla generalmente de emisiones de NO_x . Por otro lado el NO no está específicamente

y por tanto el menor consumo de ozono, con la mayor incidencia de la radiación solar, y por tanto la mayor producción fotoquímica). Durante este momento del día la concentración de NO_2 puede superar la de NO al crecer el ritmo de producción del NO_2 (por oxidación del NO) por encima del ritmo de emisiones de NO .

Posteriormente durante la tarde hay un nuevo pico de tráfico que reproduce una situación similar a la de la mañana. En este caso suele ocurrir que la mayor cantidad de ozono presente en la atmósfera modere el pico de NO , que será inferior al de la mañana, e incluso inferior al pico simultáneo de NO_2 , cuya producción está favorecida por esta mayor abundancia de ozono.

En áreas urbanas la relación NO/NO_2 es un buen indicador de la proximidad a las emisiones. Como norma general varía aproximadamente entre valores por encima de 1 en puntos de tráfico, y valores inferiores a 1 en puntos de fondo urbano o de tipo suburbano.

En el **resto del territorio**, como se ha comentado anteriormente, los niveles de NO_x caen rápidamente con la distancia a las áreas de emisión incluso en la dirección de transporte de estas emisiones (p.e. el penacho urbano de una gran ciudad). La figura de abajo ilustra esta situación.

Ciclo Diario Promedio NO_2 1999-2005

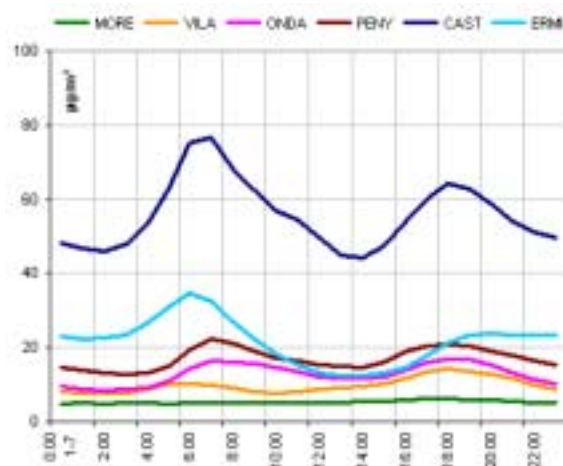


Figura 2.3: Ciclos característicos de dióxido de nitrógeno en 5 emplazamientos de la cuenca aérea de Castellón: Morella (4), Vilafranca (3), Onda (2), Peñeta (5), Ermita (1) y dentro de la ciudad de Castellón. Solo dentro de la ciudad las concentraciones de NO_2 se mantienen por encima de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (valor límite de protección a la salud para el promedio anual). Incluso Peñeta y Onda ambas a sotavento (y unos 2 km y 10 km. Aprox) de la ciudad registran niveles muy inferiores. (Valores horarios en UTC)

A lo largo del recorrido las reacciones fotoquímicas transforman los compuestos primarios en otros compuestos secundarios como el ozono, y a una distancia que depende de la cantidad de precursores disponible, de la velocidad del viento, y de la cantidad de energía que aporta radiación incidente, se alcanzará la máxima concentración de ozono (ver esquema representado por la figura 1.5).

legislado pero sí los NO_x y el NO_2 para los que hay definidos valores límite y umbral de alerta.

En este escenario de transporte la posición relativa de cada emplazamiento determina un gradiente en las concentraciones y en las pautas diarias de ozono que se acentúan con la complejidad del terreno. La figura 2.4. muestra como ejemplo **cinco patrones característicos de ozono** asociados a la dinámica de contaminantes regional anteriormente comentada para diferentes posiciones relativas dentro de una cuenca aérea al norte de la Comunidad Valenciana: costa al nivel del mar (1), media elevación a distancias intermedias entre la costa y el interior (2), fondo del valle en el interior (3), altura en el interior (4), emplazamientos de costa en altura (5). (ver esquema de la figura 2.2)

Ciclo Diario Promedio O₃ 1999-2005 (Primavera-Verano)

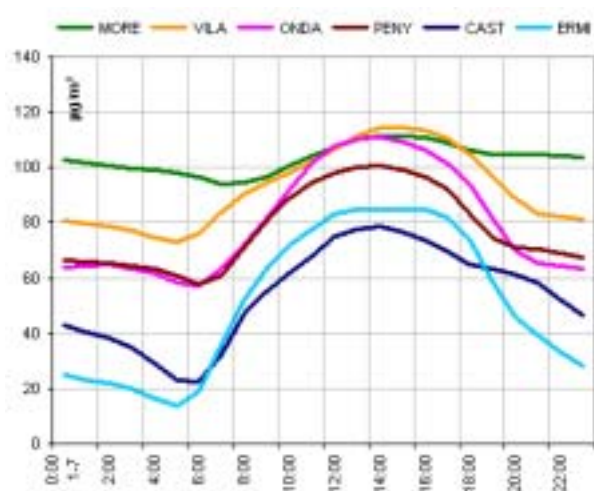


Figura 2.4: Ciclos característicos de ozono en primavera-verano en los cinco emplazamientos de la cuenca aérea de Castellón caracterizados en la figura: Morella (4), Vilafranca (3), Onda (2), Peñeta (5), Ermita (1) y dentro de la ciudad de Castellón. El retraso en 1-2h. en el máximo horario de Vilafranca se debe al tiempo del transporte de la masa aérea desde la costa hacia el interior. (valores horarios UTC)

Los niveles máximos se registran a cierta distancia a sotavento de las emisiones costeras, y se observa el retraso (1-2h como promedio) en el máximo diario en el ciclo de Vilafranca situada a unos 50 km. de la costa. Este desfase responde al transporte de la masa aérea desde la costa hasta el interior por las circulaciones de mesoescala (brisa acoplada a vientos de valle).

El gráfico permite apreciar también la diferencia en los niveles nocturnos asociada a la altitud, que determina el contacto con las capas de reserva en cotas elevadas (Morella), o con el terreno desacoplado de estas capas y donde la deposición y las emisiones residuales agotan progresivamente el ozono a lo largo del drenaje que discurre hacia la costa.

Otro proceso que se pone de manifiesto en el gráfico es que con la formación de la capa de mezcla durante la mañana (aproximadamente entre las 6h y las 8h UTC) los estratos de contaminantes que durante la noche permanecían desacoplados de la superficie, pero en contacto con puntos elevados como Morella, son incorporados a la capa superficial (fumigación)

aumentando la concentración. A esas horas se registra un mínimo relativo en el emplazamiento de altura, que coincide con el momento de mayor incremento en el resto de los puntos. Este comportamiento entre diferentes puntos dentro de una misma cuenca aérea es de esperar en otras zonas de orografía compleja.

b) Ciclo semanal.

Dentro de **áreas urbanas** la alternancia de días laborales y fines de semana se refleja en patrones característicos. Los días laborables siguen básicamente el mismo patrón diario, pero durante el fin de semana la reducción del tráfico disminuye significativamente las concentraciones de NO_x, CO y SO₂ y partículas, con los dos picos de tráfico mucho menos definidos, o incluso desaparecidos como ocurre en el ejemplo de la figura 2.5. en domingo. Por el contrario durante los fines de semana aumentan los niveles de ozono, debido precisamente a la menor cantidad de emisiones de NO, que se traduce en un menor consumo de ozono.

Estación Urbana: Ciclo Semanal Promedio 1999-2005

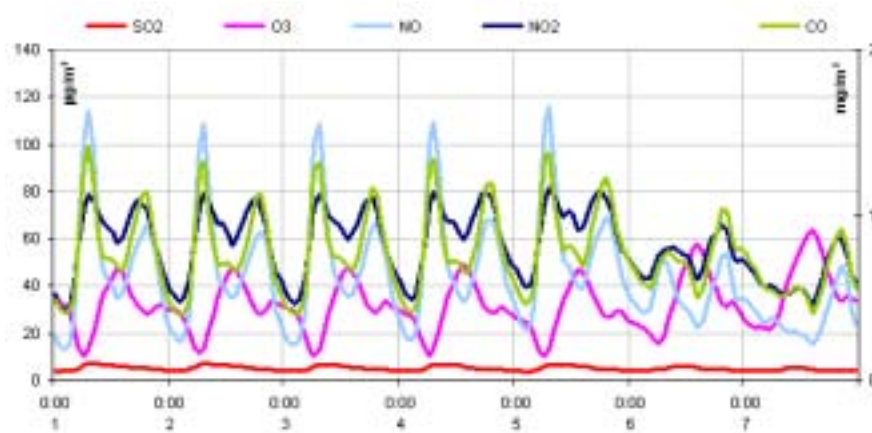


Figura 2.5 : Semana promedio en la estación de Pista de Silla en Valencia (valores horarios)

En el **resto del territorio**, lejos de la influencia directa de las emisiones frescas el consumo de ozono por el NO no juega un papel tan relevante, y los niveles del primero están más dominados por el resto de factores señalados en la introducción del apartado. En principio en áreas a sotavento de las emisiones urbanas la menor cantidad de precursores emitidos durante el fin de semana se traduce en niveles inferiores de ozono, sin embargo este comportamiento no siempre se registra. Por un lado, el mayor papel de los fenómenos de escala superior a la diaria-local, como los cambios en la situación meteorológica o la recirculación de contaminantes (que guarda memoria de lo ocurrido en días anteriores) alteran esta tendencia "a priori" en cualquiera de los sentidos (incrementando/reduciendo los niveles).

Por otro lado, el desplazamiento del tráfico urbano a zonas residenciales fuera de las ciudades también altera este patrón "a priori" en muchas zonas. Como consecuencia de todo ello en términos de niveles promedio no se observan variaciones significativas de los niveles de ozono los fines de semana, excepto en áreas urbanas o suburbanas. El ejemplo de la figura 2.6. muestra que en puntos progresivamente alejados de la influencia directa de focos identificables los niveles de ozono no varían significativamente en el fin de semana, aun que sí aumentan en emplazamientos como *Castellón*, estación urbana de tráfico.

Ciclo Semanal Promedio de Ozono 1999-2005

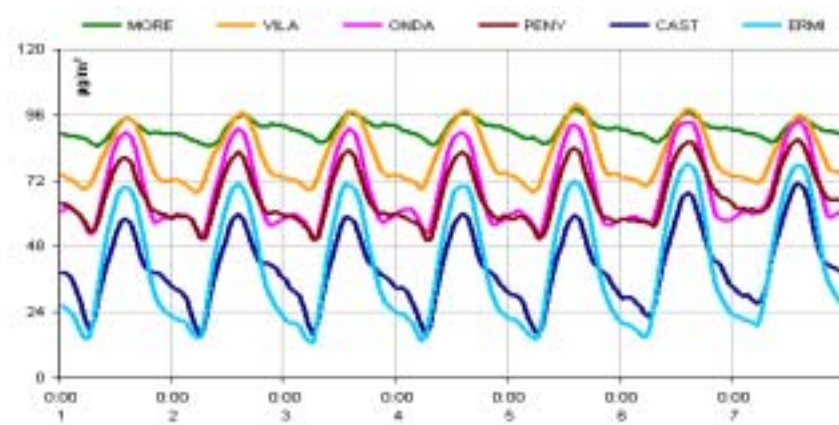


Figura 2.6: Evolución semanal del día promedio de ozono en un emplazamiento urbano de Castellón y en las cinco posiciones caracterizadas en la vertiente mediterránea peninsular

c) Ciclo estacional.

La variación estacional se registra claramente para todos los contaminantes y en todos los puntos del territorio. La curva anual de la radiación solar con máximos en verano y mínimos en invierno regula la actividad fotoquímica a lo largo del año de forma análoga a como lo hace en el ciclo diario. Como consecuencia el primer efecto es un mayor potencial de formación/destrucción de ozono/precusores en los meses más calurosos y al contrario en los meses más fríos.

En **áreas urbanas**, figura 2.7, la estacionalidad afecta a los niveles de concentración y también al valor relativo de los dos máximos de NO_x en las horas punta. En otoño-invierno la menor actividad fotoquímica provoca las concentraciones mas altas/bajas de NO_x/O_3 del año. En estos meses el pico NO_x de primera hora suele ser inferior al de la tarde puesto que en el segundo se suman emisiones nuevas a niveles ya relativamente elevados (en efecto, el mínimo relativo del mediodía es muy superior al de la madrugada). En primavera-verano la situación cambia a causa de la mayor actividad fotoquímica que reduce mucho las concentraciones de NO_x a la vez que aumenta las de ozono. En estos meses el segundo pico de NO suele ser inferior al de la mañana puesto que los niveles elevados de oxidantes a partir del mediodía moderan el aumento de sus concentraciones.

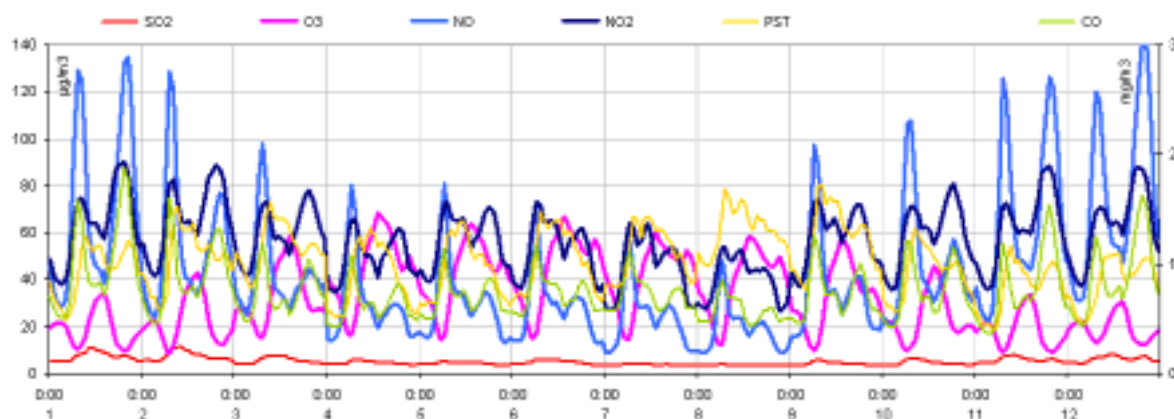


Figura 2.7.: Evolución anual del día promedio en una estación urbana de Valencia.

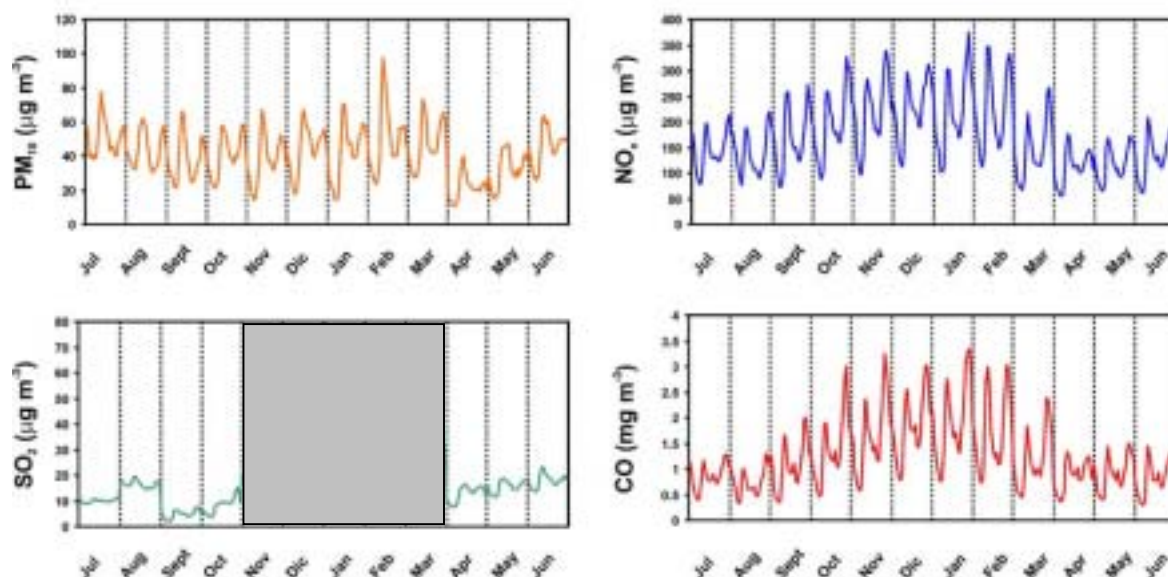


Figura 2.8: Promedio mensual del ciclo diario de contaminantes en una estación urbana de Madrid capital (Escuelas Aguirre, 1999-2000). Se observan los máximos diarios ligados al tráfico en aquellos contaminantes asociados al mismo: CO, NOx y PM10, merece la pena destacar los altos valores de fondo (mínimos diarios) que se registran a lo largo del año, concretamente los de PM10 durante los meses de verano y los de NOx en invierno. En el caso del SO₂ se ha marcado el intervalo de tiempo que coincide con el periodo de funcionamiento de las instalaciones de calefacción centralizada.

También en el **resto del territorio** el ozono aumenta gradualmente hacia los meses centrales del año cuando la mayor incidencia de la radiación solar provoca una mayor tasa de producción fotoquímica. Por otro lado en primavera y verano aumenta el alcance de las circulaciones de mesoescala y permiten un mayor recorrido de la masa aérea hasta zonas rurales más alejadas de los focos emisores. Ello favorece el incremento de los niveles de ozono en las zonas rurales hasta distancias de decenas de kilómetros de los puntos de emisión de los compuestos precursores. En muchos puntos los periodos de acumulación de contaminantes asociados a esta dinámica de contaminantes provocan el incremento de las concentraciones en periodos de varios días que a

menudo acaban en situaciones episódicas. En estos meses la distancia y la posición relativa respecto de las áreas de emisión, así como la altura sobre el nivel del mar, se manifiesta mas si cabe en los ciclos diarios característicos.

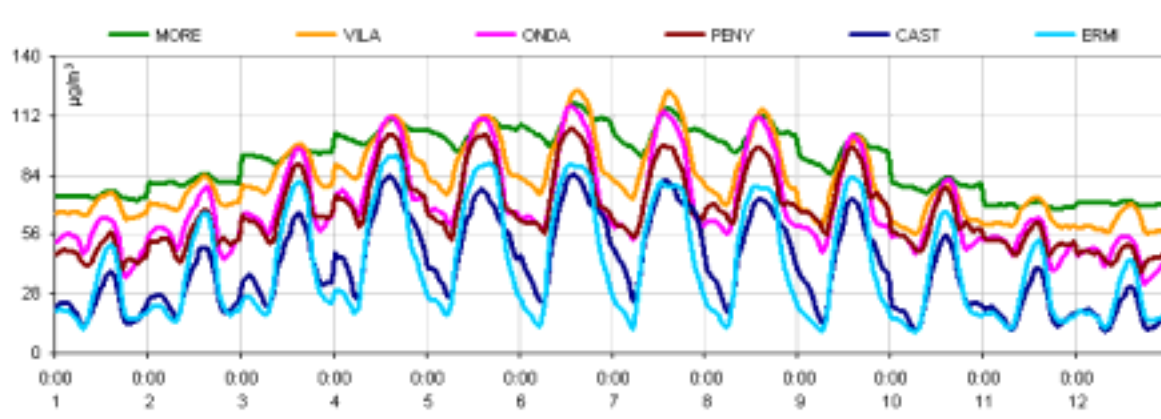


Figura 2.9: Evolución anual del día promedio los cinco emplazamientos caracterizados en la vertiente mediterránea.

Asimismo no conviene obviar, el efecto del ciclo estacional en las propias emisiones, algunas sujetas a un calendario fijo como el encendido de calefacciones en algunas ciudades, (ver niveles de SO₂ en la figura 2.8 registrado en una estación urbana de Madrid capital), y en otros casos dependiendo de otros factores tanto meteorológicos o climáticos como de diversa índole, pero que registran una variación estacional clara en su volumen de emisiones a la atmósfera. Algunos ejemplos más de ciclos estacionales en las emisiones antropogénicas son las emisiones de tráfico en algunas zonas turísticas, emisiones industriales de algunos sectores, o las emisiones biogénicas de especies autóctonas. Todo ello debe ser considerado a la hora de interpretar los datos de una estación de calidad del aire que presente este tipo de efecto característico de un ciclo estacional.

2.1.2. Evolución de los registros horarios. Relación de las variables de concentración entre sí y con las variables meteorológicas.

En cada punto de medida el cambio continuo de los factores que determinan la evolución de las concentraciones de contaminantes (emisiones, reacciones químicas, y condiciones atmosféricas - meteorológicas), se traducen en cambios también continuos de las concentraciones y de los parámetros meteorológicos que están relacionados entre sí. Por ejemplo, la evolución en las pautas de emisión afecta directamente a las concentraciones medidas, un incremento significativo de la velocidad del viento contribuye a la mezcla atmosférica, y en principio favorece la reducción de las concentraciones, los cambios en la intensidad de la radiación solar debido a variaciones en la nubosidad, se traduce en una mayor o menor actividad fotoquímica, y por tanto en un aumento

o reducción de la formación de contaminantes secundarios, los cambios en la dirección de viento varían la dirección del transporte del penacho de un foco emisor, o directamente están asociados a la entrada de una masa aérea diferente con diferentes características físico-químicas, etc.

En consecuencia, la correcta interpretación de la evolución de las concentraciones de contaminantes requiere el análisis de la variación conjunta de estos entre sí y con las variables meteorológicas (velocidad y dirección del viento, temperatura, radiación, humedad relativa).

Así mismo las condiciones meteorológicas a escala sinóptica y el conocimiento de la dinámica de contaminantes en relación con estas condiciones ayudan a interpretar dicha evolución. El examen complementario de los mapas meteorológicos (presión a diferentes alturas, campos de viento, líneas de corriente, temperaturas ...) disponibles en las webs de los centros meteorológicos, es muy recomendable. Y por supuesto también es fundamental conocer la situación del punto de medida dentro de la cuenca aérea donde se localiza, y la distribución de las emisiones en dicha cuenca.

En este apartado el interés se centra en la interpretación de las series de datos horarios de calidad del aire, y en la conveniencia de recurrir a representaciones gráficas apropiadas, donde se pongan de manifiesto las relaciones causa-efecto que afectan a las variables medidas. Para ello se muestran algunos ejemplos en diferentes puntos de la geografía española recurriendo a la representación gráfica simultánea de los registros de contaminantes y variables meteorológicas en periodos determinados, y se comentan los aspectos mas relevantes en cada caso.

✧ **Ejemplo vertiente mediterránea:**

El gráfico de la figura 2.10 muestra una secuencia de dos periodos consecutivos de acumulación de ozono de aproximadamente cuatro días cada uno, en la segunda quincena de Junio de 2002. Los registros corresponden a la estación automática de Vilafranca en el interior norte de Castellón, en un entorno rural, aunque en ocasiones registra la influencia de emisiones desde fuentes puntuales y localizadas.



Ambos periodos se identifican claramente entre los días 20 y 23, y entre el 24 y el 27 de Junio, y están asociados a condiciones anticiclónicas con desarrollo de las circulaciones de mesoescala, en días con cielos despejados y temperaturas moderadas, como muestran los registros de radiación y temperatura. Los registros de partículas siguen una pauta cualitativamente semejante

a la de ozono, de manera que en gran medida estarán asociadas al transporte de las emisiones costeras hacia el interior, y a la recirculación vertical de la masa aérea característica de la región (resumida brevemente al principio de este apartado y esquematizada en la figura 2.2).

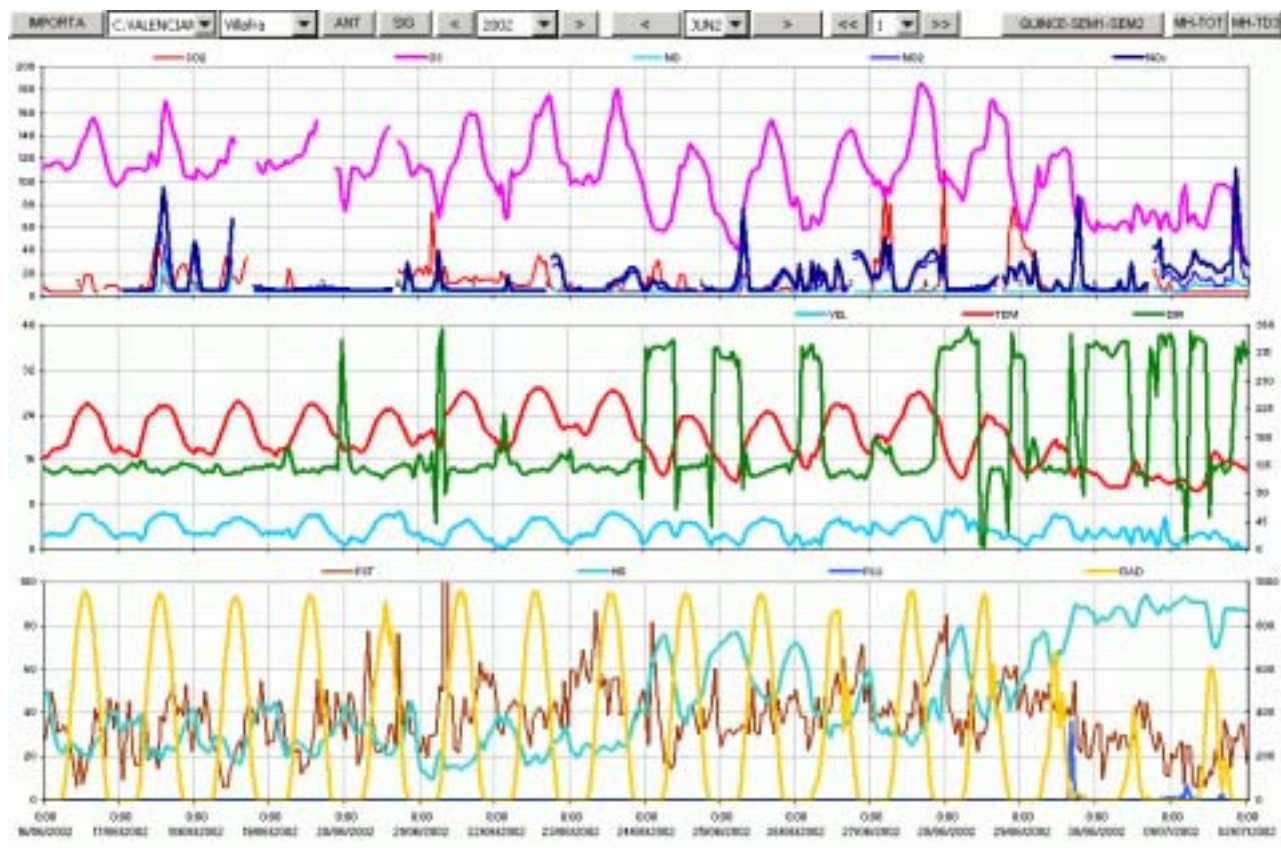


Figura 2.10: Evolución conjunta de las concentraciones de contaminantes y las variables meteorológicas en el periodo del 16 de Junio al 1 de Julio en la estación de Villafraña (Castellón). Esta estación está localizada a unos 50 Km. de la costa. (Promedios horarios UTC. DIR y RAD escala en el eje derecho.)

En los cuatro días previos al primer periodo de acumulación la influencia de un forzamiento del SE, a causa de un centro de alta presión al norte de Italia, mantiene velocidades apreciables de viento de esa dirección durante la noche. Ello evita el desacoplamiento de la capa atmosférica superficial, y mantiene niveles de ozono relativamente elevados y constantes en esas horas (cuando este desacoplamiento se produce los niveles nocturnos en superficie se reducen debido a deposición sobre el terreno y contacto con emisiones residuales). Por otra parte, dentro de una situación de niveles relativamente elevados de ozono a escala regional esta advección del E transporta parte de la masa aérea contaminada fuera de la zona hacia el interior de la península, y evita la recarga de contaminantes que se observa en días posteriores.

A partir del día 20 desaparece este forzamiento sinóptico y se registran calmas nocturnas. En los cuatro días que siguen las circulaciones de mesoescala sobre la vertiente costera mantienen la masa aérea recirculando, y acumulando los contaminantes emitidos en las áreas urbanas e

industriales de la costa junto con los productos secundarios generados por la actividad fotoquímica. Como consecuencia los valores máximos de ozono (y partículas) se incrementan progresivamente durante esos cuatro días.

Este periodo de acumulación se interrumpe en la madrugada del día 24 a causa de la entrada de una masa de aire desde el Norte. Esta entrada de aire con diferentes características físico-químicas se manifiesta con el incremento de la velocidad, el descenso brusco en la temperatura, y el aumento igualmente brusco en la humedad relativa.

A partir de este periodo transitorio, que supone una limpieza significativa de la masa aérea, se vuelve a entrar en otro periodo de acumulación marcado por los procesos de recirculación, y de nuevo con un incremento gradual de los máximos de ozono durante cuatro días. Este segundo periodo acaba en la superación del umbral de información ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$) el día 27 durante tres horas. Esta superación, en general todos los máximos registrados, ocurre durante la tarde entre las 15 y las 18h (UTC), a causa del desfase de tiempo en la llegada de la masa aérea desde la costa.

El día 28 los niveles de ozono empiezan a decaer debido a una situación similar a la que se dió en la madrugada del 24, y se reducen drásticamente a lo largo de los días siguientes en que los registros muestran la presencia de nubosidad (en la serie de radiación), precipitaciones, reducción de las temperaturas, y la práctica desaparición del régimen de brisas.

Por último, aunque no de forma tan evidente como en otros emplazamientos más influidos por emisiones en el entorno, se puede apreciar en varios momentos la caída puntual del ozono como respuesta a presencia de concentraciones de NO. Estas concentraciones van acompañadas de SO₂, y se observan con viento del Sur o con ausencia de vientos (calmas). Debido a las características del entorno próximo de la estación todo es indicativo de emisiones de la fábrica textil cercana a la población junto con el tráfico, escaso, que pueda circular en el entorno del emplazamiento.

De hecho para la interpretación correcta de los datos de SO₂ en este emplazamiento, y discernir la fuente de tales emisiones, es importante la observación simultánea con los NO_x y la dirección del viento (y la comparación con los registros en otros puntos de medida en la zona), ya que esta comarca recibe a menudo el impacto del penacho, con más frecuencia en Otoño-Invierno, de las emisiones de la Central térmica de Andorra (Teruel), a unos 60 Km. al NO de Vilafranca.

€ Ejemplo en la Costa de Huelva:

En este ejemplo se muestra el periodo entre el 18 y el 30 de Julio de 2003 en el área costera de Huelva. Las series de ozono corresponden a las estaciones de El Arenosillo, Cartaya y la ciudad de Huelva todas ellas ubicadas en área costera de Huelva, y la estación de Valverde ubicada en un lugar interior de esta misma provincia a unos 50 km. al norte. Los datos de viento corresponden a una torre meteorológica ubicada en Punta del Sebo, entre la ciudad y El Arenosillo.



Durante estos días las condiciones sinópticas cambiaron ligeramente afectando a la dirección del viento durante la noche, y como consecuencia a las concentraciones de ozono a escala local.

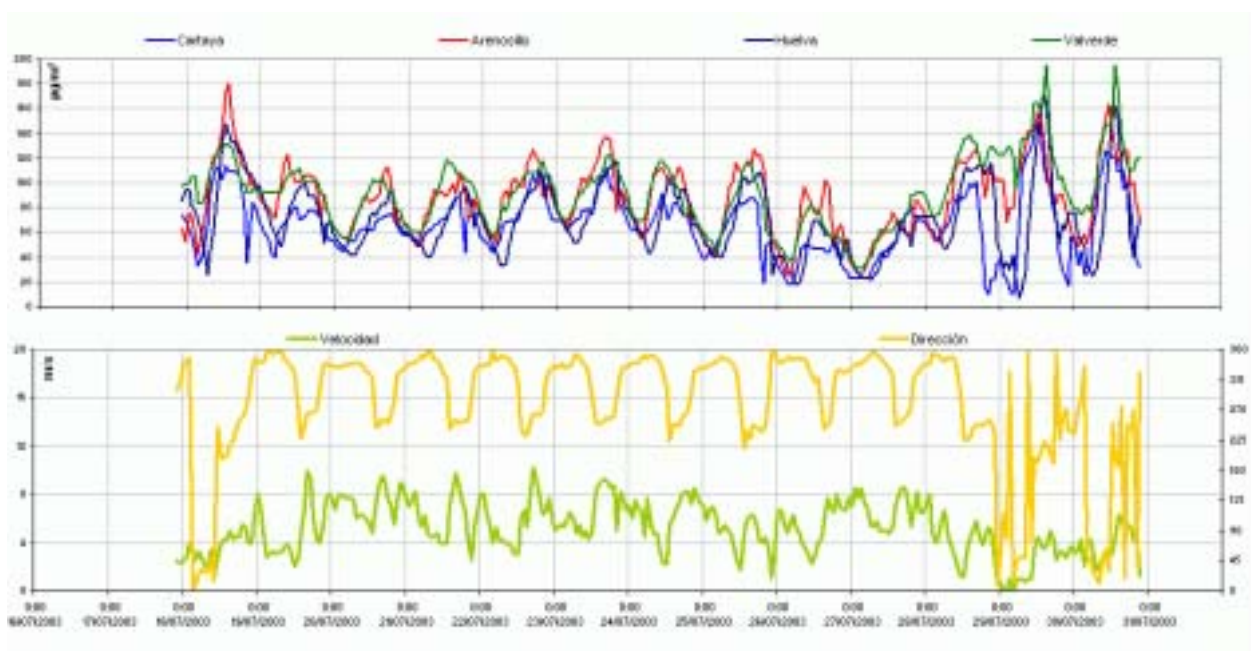


Figura 2.11: Evolución de las concentraciones de ozono del 18 y 30 de julio de 2003. Datos meteorológicos tomados de una torre en Punta del Sebo, Huelva. Promedios horarios UTC. (Fuente datos: J.A.Adame, 2005 [ref. 15])

En todo el periodo predomina el régimen de brisas bajo una situación sinóptica marcada por el predominio del anticiclón de las Azores. Entre los días 19 y 27 la combinación del gradiente sinóptico del NW con la orografía de la zona favorecen el drenaje nocturno del NW, asociado a la canalización de los valles del Odiel y Oranque, en lugar del drenaje del NE asociado a la canalización nocturna por el valle del Tinto - Guadalquivir, que es el que registra en los periodos anterior y posterior a este.

Esta situación provoca en una reducción y mantenimiento de concentraciones bajas de ozono en ese periodo, que se manifiesta básicamente a escala local en el entorno de Huelva (no muy lejos de allí el día 22 se registra una superación del umbral de información en la estación de Aljarafe próxima a Sevilla).

A partir del 28 con la extensión del anticiclón en cuña hacia Centroeuropa se establece de nuevo el drenaje nocturno del NE, en este caso sin un gradiente sinóptico significativo como se aprecia en los registros de velocidades menores durante la noche. Este cambio en las condiciones meteorológicas se traduce en concentraciones que se incrementan rápidamente hasta valores en torno a $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el área de Huelva, y próximos a $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Valverde.

En gran parte esta diferencia de comportamiento en los niveles de ozono en Huelva se debe a que con la brisa manteniéndose en el mismo eje (régimen nocturno y diurno alineados), la masa aérea recircula, al menos horizontalmente, y acumula ozono de un día para otro. Sin embargo cuando se establece la componente nocturna del NW (situación muy frecuente en verano [ref. 15]), la masa aérea es desplazada hacia el SE durante la noche-madrugada, y aunque puede penetrar de nuevo a la mañana siguiente, en todo caso lo hará en puntos de la costa más al este. La figura de abajo ilustra esta situación. Se trata de pseudo-trayectorias (suma vectorial de los 24 vectores velocidad, ver figura 1.3 en la página 17) calculadas a partir de los registros de una torre meteorológica del INM en Huelva los días 25 y 29 de julio.

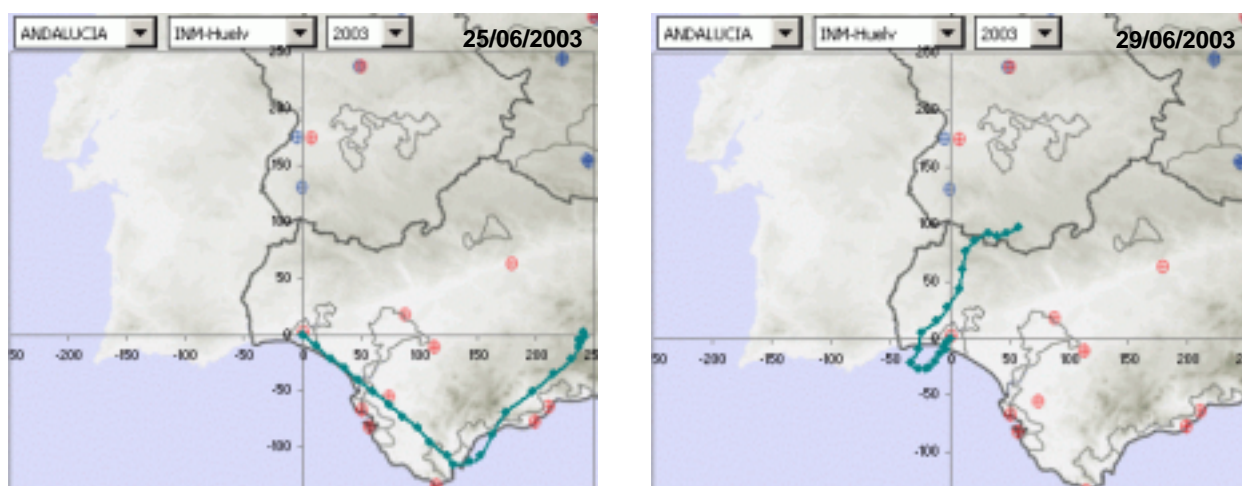


Figura 2.12: Pseudo-trayectorias (suma vectorial de los 24 vectores velocidad tomadas en un punto determinado, ver figura 1.3 en la página 17) calculadas a partir de los datos de la torre del INM ubicada en Huelva los días 25 (izquierda) y 29 (derecha) de julio. En el segundo caso el transporte en un mismo eje favorece la recirculación de la masa aérea y por tanto el incremento de ozono en el entorno de la ciudad de Huelva.

2.1.3. Caracterización de episodios de alta concentración de contaminantes

En este apartado se muestran algunos ejemplos más en tres de los puntos de la península donde se registran con mayor frecuencia episodios de altas concentraciones de contaminantes. Concretamente se han seleccionado episodios en el área de Sevilla, Madrid, y Puertollano.

≠ Área de Madrid

La cuenca aérea de Madrid tiene una dinámica de contaminantes característica, muy condicionada por la orografía en los meses centrales del año [ref 16]. En estos meses las condiciones anticiclónicas con poco gradiente sinóptico sobre la península, favorecen el establecimiento de circulaciones de mesoescala. El calentamiento de las laderas de la Sierra de Guadarrama orientadas al sur provoca el desarrollo de vientos con esta componente, y por tanto el transporte de las emisiones urbanas de la capital hacia el norte. El patrón general de estas circulaciones tiende a establecerse en el eje SW-NE, con el drenaje nocturno habitualmente del NE girando a lo largo del día en sentido horario hasta el SW (ver figura 1.4). Como consecuencia de esta dinámica se registran habitualmente concentraciones elevadas de ozono en todo el arco al norte de la ciudad.

La figura 2.13 es un ejemplo que ilustra esta situación a partir de los registros de ozono en las estaciones automáticas de San Martín, Guadarrama, Buitrago y Campisábalos (Guadalajara) en un periodo entre Julio y agosto de 2004. Además de estas cuatro series se representan también los datos de partículas y variables meteorológicas medidas en la estación de Alcobendas.



En el periodo del 28 al 1 de agosto se registran superaciones del umbral de información ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$), y en particular el día 30 los niveles casi alcanzan el umbral de alerta en Buitrago. Entre otras cosas destaca también la secuencia de los máximos de ozono. El orden San Martín -Guadarrama- Buitrago se debe a la posición relativa de estos puntos respecto a la capital, y al giro en el viento en sentido horario, desde NE a primera hora hasta SW a última hora de la tarde. Los datos registrados por la estación EMEP de Campisábalos, en las estribaciones orientales de la sierra, sugieren que esta dinámica de transporte se extiende hacia el norte de Guadalajara los días 27 y 28 de Julio, y 1 y 2 de Agosto (entre el 29 y el 1 no porque el giro en el viento no es completo), aunque con concentraciones de ozono sensiblemente inferiores. A lo largo de todo el periodo las partículas PM₁₀ muestran la

misma pauta general que el ozono registrándose la superación de valor límite diario para la protección a la salud humana ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en varios de los días entre el 28 de Julio y el 2 de Agosto .

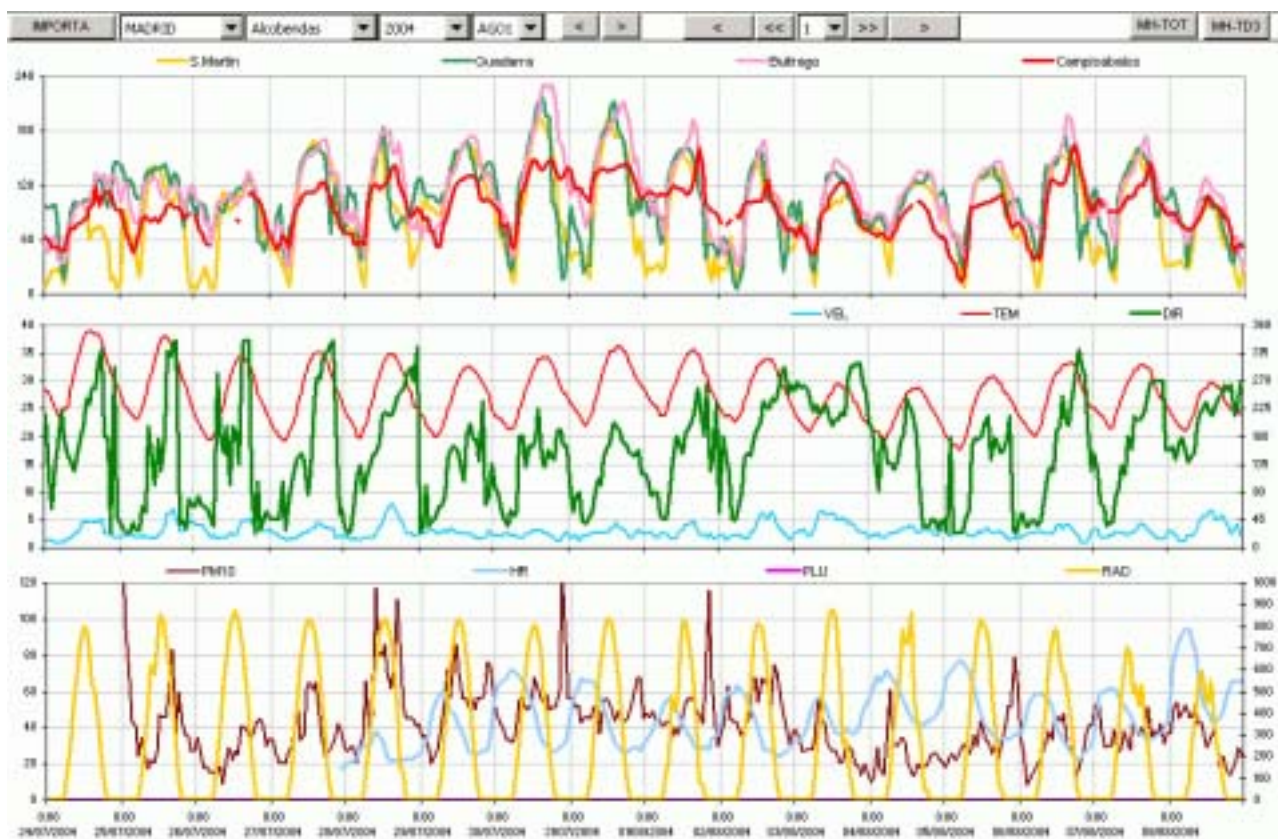


Figura:2.13: El gráfico ilustra la secuencia de los máximos de ozono en la cuenca de Madrid bajo circulaciones de mesoescala. El orden San Martín -Guadarrama- Buitrago se debe a la posición relativa de estos puntos respecto a la capital, y al giro en el viento en sentido horario.

El ejemplo siguiente, también en Madrid, ilustra una situación episódica característica de invierno, cuando se establecen condiciones anticiclónicas sin gradiente barométrico durante varios días. En estas situaciones de estancamiento apenas existe transporte de la masa aérea y las emisiones se acumulan sobre la ciudad. Como consecuencia los niveles de PM10, NOx y CO se incrementan progresivamente dentro del área urbana hasta superar los valores límite definidos para estos contaminantes.

WINTER EPISODE

MADRID AIR QUALITY NETWORK

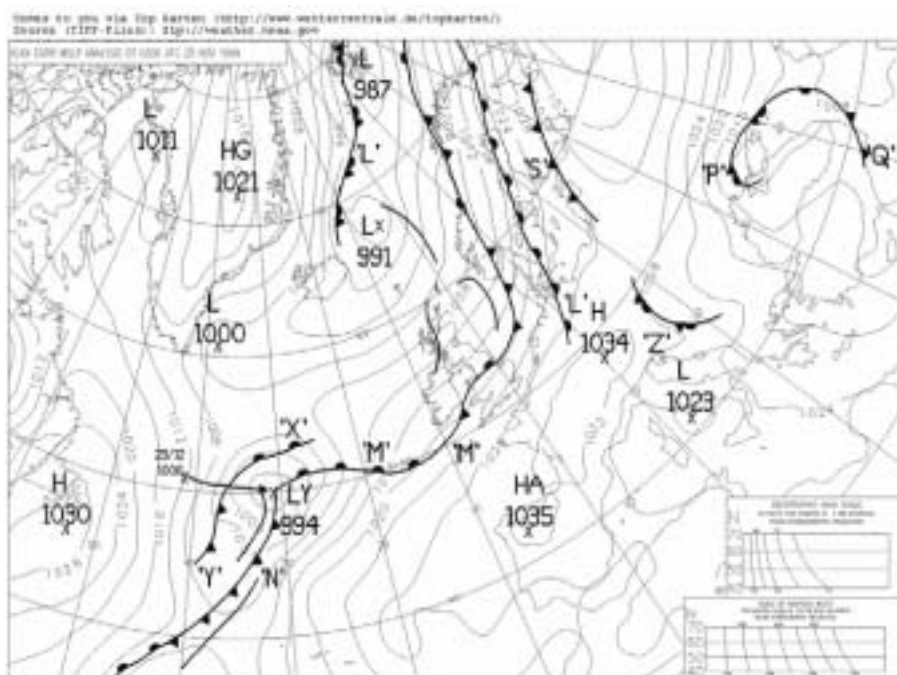
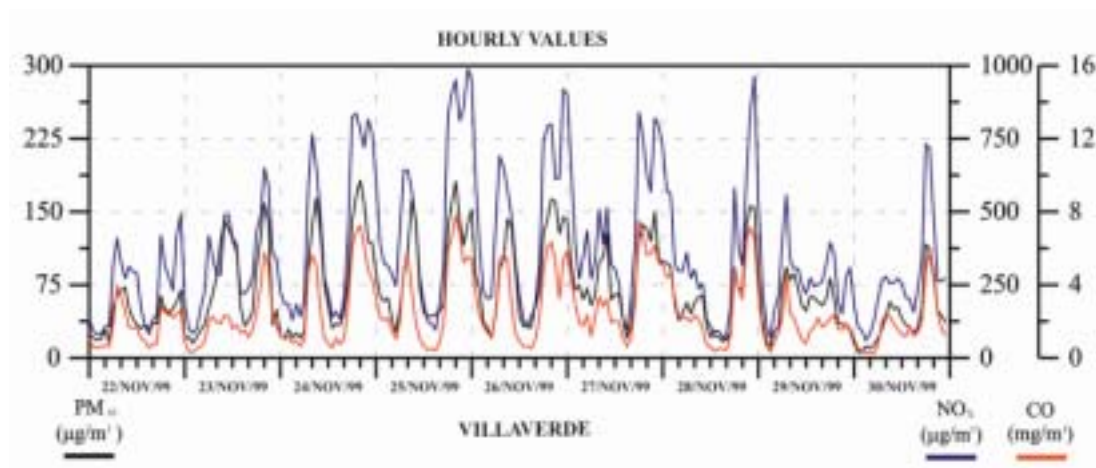
DAILY MEAN VALUES

PM₁₀ (µg/m³)

20-Nov-99 21-Nov-99 22-Nov-99 23-Nov-99 24-Nov-99 25-Nov-99 26-Nov-99 27-Nov-99 28-Nov-99 29-Nov-99 30-Nov-99

— VILLAVEJIDE — Pu FIEZ LADREDA — ALTO DE EXTREMADURA

Date	VILLAVEJIDE (µg/m ³)	Pu FIEZ LADREDA (µg/m ³)	ALTO DE EXTREMADURA (µg/m ³)
20-Nov-99	18	15	15
21-Nov-99	20	18	18
22-Nov-99	45	40	45
23-Nov-99	75	72	75
24-Nov-99	80	65	78
25-Nov-99	88	70	75
26-Nov-99	88	65	70
27-Nov-99	85	65	68
28-Nov-99	65	48	60
29-Nov-99	55	50	65
30-Nov-99	40	32	45



€ Area de Sevilla

Como caso representativo de episodio de contaminación en el área de Sevilla se presenta el que tuvo lugar entre el 11 y el 14 de julio de 2004. Durante estos días se superaron los umbrales de información a la población para el ozono ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$). El gráfico de la figura 2.15 muestra la evolución de las concentraciones medidas en las estaciones del Aljarafe (ubicada en una zona suburbana del área metropolitana al oeste de la ciudad), Alcalá de Guadaira y Dos Hermanas, dos localidades al sur de la ciudad de Sevilla, y Santa Clara, dentro de la propia ciudad en la zona este.

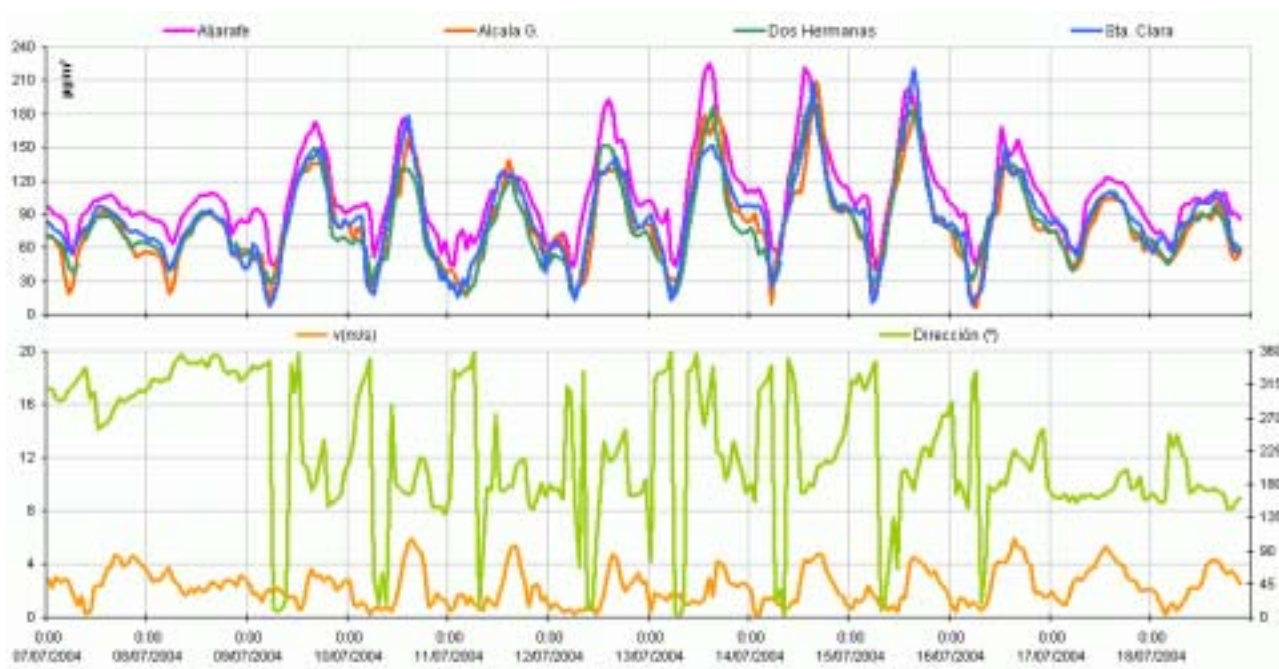


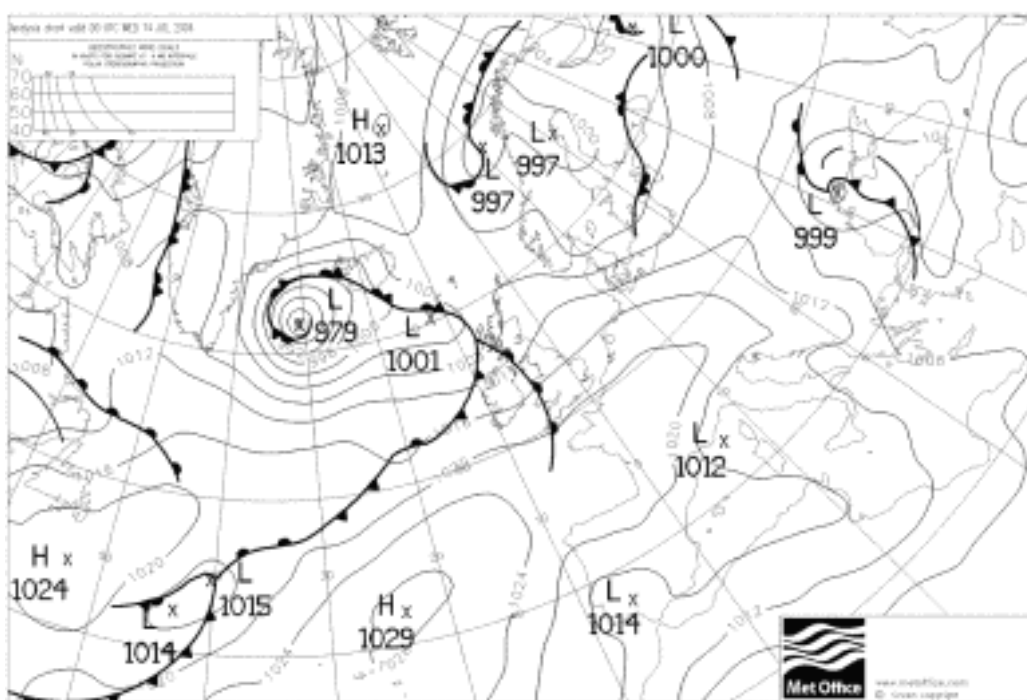
Figura 2.15: Registros de ozono de cuatro estaciones en el entorno de la ciudad de Sevilla, y registros meteorológicos de

En los días 7 y 8 de julio la situación sinóptica está marcada por el paso de un frente asociado a un centro de bajas presiones al sur de las islas británicas. Bajo esta situación los registros muestran vientos sostenidos del NW-N, y niveles bajos-moderados de ozono a causa de la limpieza atmosférica que ejerce esta advección.

A partir del día 9 se observa una transición a una situación de mayor estabilidad, que permite el desarrollo de las circulaciones locales, y que se refuerza progresivamente en los días siguientes.

con la extensión del anticiclón Atlántico sobre Europa a partir del día 11. En ese tránsito de un escenario meteorológico dominado por la escala sinóptica, con viento procedente del NW, a otro más dominado por las circulaciones de mesoescala, se produce un incremento considerable de las concentraciones de ozono (mientras que los días 7 y 8 de julio las concentraciones apenas alcanzan los $100 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$, sólo un día después, el día 9 las concentraciones máximas se acercan al umbral de información a la población).

Entre los días 11 y 14 la situación ya es típicamente anticiclónica con formación de la baja térmica en el sudeste de la Península (figura 2.16). En este periodo predominan las circulaciones de mesoescala, que en este punto se manifiestan con la canalización del valle del Guadalquivir, y como consecuencia la recirculación de la masa aérea por la región de interés. Esta masa se va cargando tanto de ozono como de precursores emitidos en la propia ciudad de Sevilla a los que habría que añadir, el ozono y los precursores que pueden llegar también a esta zona desde el litoral de Huelva o de Cádiz. En esta fase crítica del evento las concentraciones máximas de ozono son muy elevadas en casi la totalidad de estaciones ubicadas en la zona urbana de Sevilla y su área metropolitana, registrándose picos de ozono superiores a los $200 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ en las estaciones del Aljarafe, Alcalá de Guadaira o Santa Clara.



período estival. Dicha baja se ha ido intensificando, condicionando a partir del día 15 la dinámica atmosférica de zonas como el área de Sevilla. En los registros de viento se observa como la brisa no se llega a estar tan definida, y como ya el día 16 el viento en superficie procede del sur, condicionado por la presencia de dicha baja en el centro peninsular. Se está por tanto en la fase final del evento.

El viento persistente del sur hace que la masa envejecida sea dispersada, y que en la zona de interés se mida ozono que se forme fotoquímicamente in situ o bien que sea transportado desde el tramo bajo del valle del Guadalquivir. La consecuencia es una disminución en las concentraciones de ozono de casi $100 \text{ } \sigma\text{g m}^{-3}$, el día 14 se registraban máximos de ozono superiores a los $200 \text{ } \sigma\text{g m}^{-3}$ y el día 16 los máximos apenas alcanzan los $100\text{-}120 \text{ } \sigma\text{g m}^{-3}$.

≠ **Area de Puertollano**

En el área de Puertollano se combina la presencia de emisiones industriales y unas características orográficas que favorecen los episodios de contaminación a primera hora de la mañana bajo condiciones anticiclónicas de escaso gradiente sinóptico. Estos episodios están asociados a la fumigación sobre el terreno de los contaminantes que han quedado atrapados durante la noche en la capa residual nocturna, y que son "bajados" a la superficie con la formación de la capa de mezcla (por la mañana el calentamiento del terreno genera turbulencia térmica, y mezcla verticalmente la masa aérea rompiendo la inversión térmica creada la noche anterior por enfriamiento radiativo de la superficie).

Estos episodios se manifiestan habitualmente en forma de picos de ozono con concentraciones muy elevadas en torno a las 8h (UTC), que duran 1-2 horas, y que suelen ir acompañados de valores también elevados de SO_2 y Partículas (en ocasiones superando también los valores límite). En gráfico de la figura 2.17 correspondiente a la estación de *Campo de fútbol* se observa que el pico coincide cada día con el momento inmediatamente anterior al establecimiento de las circulaciones de viento, y después de un periodo de calmas nocturnas. Este es el momento en que se forma la capa de mezcla.

Los picos de NO_x y CO que se observan en el gráfico van adelantados aproximadamente una hora respecto al pico de ozono. Estas concentraciones no van asociadas a la fumigación desde capas altas, sino a las emisiones que se están produciendo en ese momento en el área industrial próxima a la población, y en menor medida del tráfico.

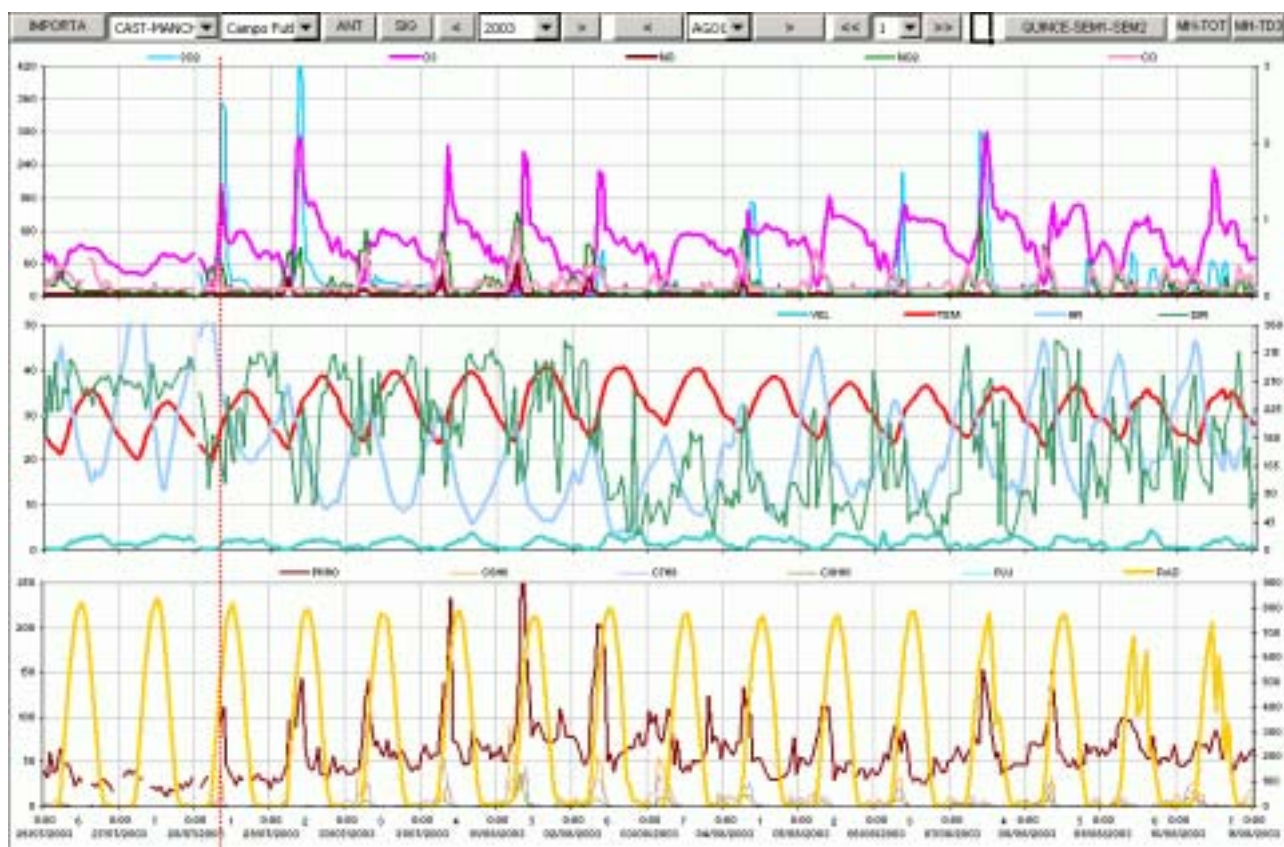


Figura 2.17: Registros de contaminantes y variables meteorológicas en la estación automática Campo de Fútbol en Puertollano. En el periodo representado se aprecian episodios sistemáticos de 1-2h a primera hora de la mañana (8 UTC). Este comportamiento obedece a la fumigación sobre el terreno de los contaminantes atrapados en la capa residual nocturna durante la noche.

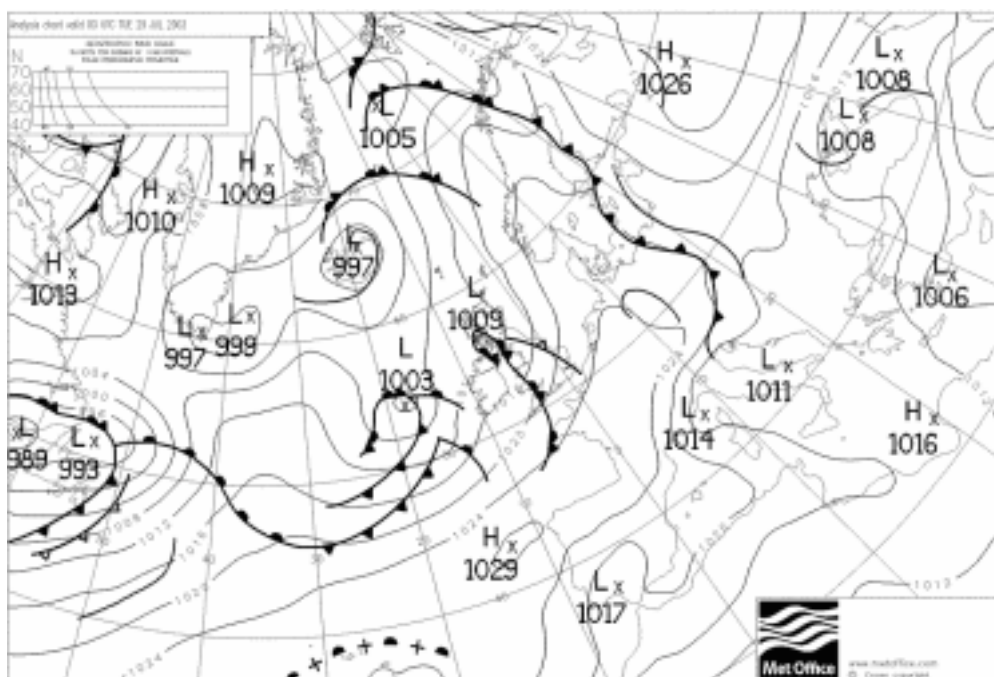


Figura 2.18: Mapa de presión en superficie el 29 de Julio de 2003. Las condiciones anticiclónicas predominan sobre la península ibérica y en buena parte del resto de Europa (Fuente: Met office)

2.1.4. Interpretación de series de datos y control de calidad.

El análisis e interpretación de las series de datos que se ha tratado en el apartado anterior tiene una aplicación muy importante en el control de calidad de las redes. Aunque básicamente los equipos de medida funcionan correctamente con alguna frecuencia se producen fallos que tienen como consecuencia el registro de medidas incorrectas, y que por tanto deben ser filtradas o invalidadas de la base de datos. Además del cálculo rutinario de los parámetros estadísticos (promedios, máximos, mínimos, percentiles...), que ayudan a localizar los errores más gruesos en las series de datos, la representación gráfica es un procedimiento eficaz para detectar datos no válidos (y de paso detectar también posibles averías en los equipos).

El grupo de trabajo "*Grupo Control y garantía de calidad en las redes de vigilancia de calidad del aire*" aborda en su documento la validación de datos y propone una serie de recomendaciones para su adecuada implementación. Las dos primeras recomendaciones son:

- *El personal encargado de la validación debe ser cualificado. Esto implica capacidad y experiencia en el reconocimiento y la interpretación de los patrones espacio-temporales, que siempre van asociados a las series de datos.*
- *Esta interpretación requiere de herramientas (software) específicas, consistente fundamentalmente en programas para la representación gráfica en las escalas espacio-temporales adecuadas, de forma ágil y flexible (posibilidad de escoger periodos temporales específicos para reconocimiento de ciclos diarios, semanales, estacionales..., agrupamientos de series de diferentes puntos de medida y de diferentes variables- de concentraciones y meteorológicas- que muestren la coherencia y consistencia esperable en términos estadísticos, ...).[...]*

La referencia al uso de representaciones gráficas en las escalas espacio-temporales adecuadas se refiere a que la presencia de datos no válidos puede deberse tanto a problemas puntuales, que generan datos no válidos en periodos relativamente cortos, como a problemas persistentes que pueden generar datos no válidos durante periodos largos si no se detectan a tiempo.

La detección de medidas no válidas en periodos cortos se basa en la comparación de las variables medidas en la cabina entre sí (siguiendo el esquema mostrado en el apartado anterior), y en la comparación con las series registradas en otros puntos de medida con los cuales es conocida algún tipo de correlación.

La detección de errores persistentes se basa además de en el análisis anterior, en la comparación de la serie de datos consigo misma para comprobar la consistencia temporal de las medidas.

El ejemplo de la figura 2.21 muestra un caso relativamente frecuente en muchas redes de calidad del aire. La serie histórica de mínimos diarios de los promedios horarios muestra un incremento en $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de este parámetro a partir de Enero de 2001, que revela un problema de calibración del monitor. Este tipo de problemas suponen generalmente un número de superaciones del valor objetivo superior a las ocurridas realmente. Y en las rosas de viento de la figura 2.19 se pueden apreciar igualmente problemas en los datos horarios, que en este caso no están asociados a problemas técnicos de los sensores meteorológicos sino a un procesado incorrecto de las medidas.

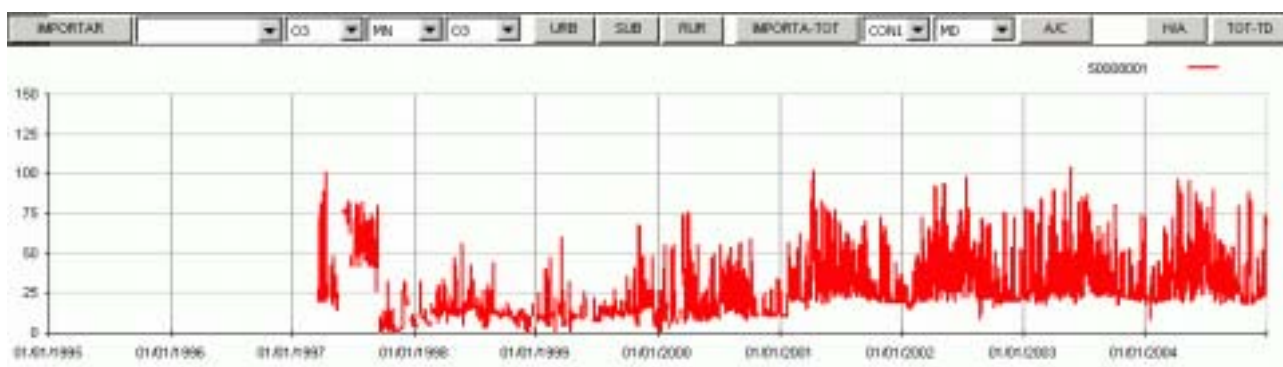


Figura 2.21: Serie histórica de mínimos diarios de los promedios horarios en una estación automática de calidad del aire. A partir de Enero de 2001 los registros se incrementaron sistemáticamente en $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este comportamiento revela un problema de calibración del “cero” del monitor (lo mismo pero más acentuado se aprecia también en un periodo de varios meses en 1997).

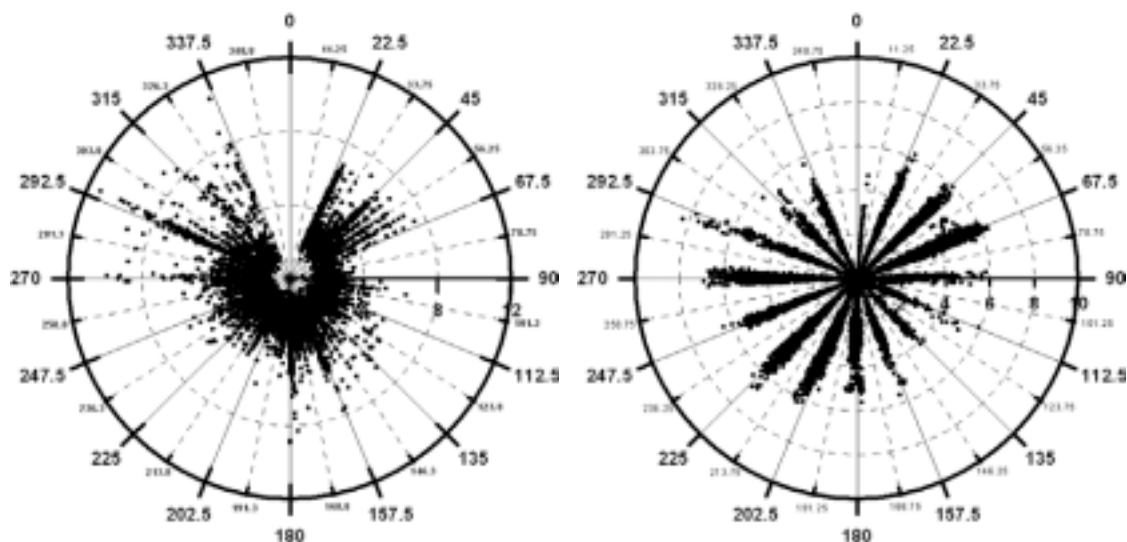


Figura 2.19. Izquierda: Distribución anual en rosas de viento de datos horarios correspondientes a una estación de una red de vigilancia de la calidad del aire durante el año 2000. La ausencia de datos en el sector centrado en la dirección Norte confirma la existencia de algún error asociado en el sistema de adquisición de datos, seguramente debido al tratamiento como escalar de una magnitud vectorial como el viento (módulo = velocidad, y dirección). Derecha: Distribución anual de los datos horarios de una estación de calidad del aire durante el año 2004. Al igual que la figura anterior, la representación gráfica de los datos meteorológicos permite identificar problemas asociados a los sistemas de adquisición o tratamiento de los mismos.

2.2. CRITERIOS UNIFICADOS DE MANEJO DE LOS DATOS.

Por regla general, la cuestión mas importante, en legislación de calidad del aire, ha sido la de tener claros cuales son los valores de referencia (límites, objetivos, umbrales, etc.) para determinar la bondad o no de la calidad del aire que respiramos. Por ejemplo, bastaría decir que en una ciudad la calidad del aire para dióxido de nitrógeno se encuentra por debajo de umbral de evaluación inferior para que un especialista sacara muchas conclusiones sobre la calidad del aire en dicha ciudad para el contaminante al que está referida; el problema sería quizás el como transmitirla al ciudadano.

En la legislación medioambiental se recoge con claridad la necesidad de comunicar esta información a la población y las técnicas analíticas de referencia. También se menciona, aunque puede ser interpretativo, el número mínimo de puntos de muestreo, la micro o macro implantación, la modelización etc. y lo que va a ser objeto de este apartado como son los criterios a seguir para llegar a obtener las concentraciones de los diferentes contaminantes y poder compararlas con los valores de referencia de la legislación.

En estos momentos la Comisión ya ha cumplido, con la adopción de la 4ª Directiva hija, el completar la legislación para los contaminantes recogidos en el Anexo I de la denominada Directiva Marco. No obstante a largo de los últimos años se han detectado algunas carencias o lagunas, sobre todo con el material particulado y la Comisión ha decidido refundir y completar, en una sola Directiva, la 3 primeras Directivas hijas así como la denominada Decisión de Intercambio de Información (Decisión Eol 2001/752/CE).

Como es natural, todo esto va a venir acompañado con una nueva Guía para armonizar los criterios de aplicación y cálculo con los Estados Miembros. Se esperaba que antes de la celebración de este V Seminario ya estuviera lista, al menos, una versión casi definitiva que nos sirviera de referencia; al no ser así se ha tomado la decisión de seguir adelante y tratar de armonizar lo más posible dichos criterios, que se revisarán cuando se conozca dicha Guía.

Los documentos que han servido de base para este texto son básicamente las Directivas y Decisiones Comunitarias actualmente en vigor, la Guía establecida para el intercambio de información de abril de 2002, y la propuesta de nueva Directiva (versión de 21 de junio de 2006).

Los criterios que se van a mencionar a continuación serán de aplicación a todas las Redes en el ámbito nacional cuyo objetivo sea el evaluar la calidad del aire de acuerdo a la

legislación vigente. No será de aplicación a redes de medida de calidad del aire regidas por otros protocolos, como por ejemplo la Red EMEP, de investigación. etc.

Parte de estos criterios son obligatorios ya que se encuentran recogidos en la legislación actual (o futura si hablamos de la nueva propuesta de Directiva) sin embargo otros, que son los que si interesa más armonizar, son los no mencionados explícitamente en la legislación o aquellos que, aunque mencionados, pueden ser interpretados de varias maneras.

La finalidad de este documento es dar unas directrices para que, partiendo de unos mismos datos brutos de medición, técnicos diferentes lleguen a un mismo dato procesado (medias, número de superaciones....) que pueda ser comparado con la legislación vigente de calidad del aire (respetando al máximo las condiciones de cálculo y toma mínima de datos de la legislación).

Para ello se van a mencionar criterios: de almacenamiento, de agregación de datos y de cálculo reproduciendo los pasos que un gestor de red empleará para, partiendo de un dato bruto medido válido, obtener los valores de referencia de la legislación y determinar con las suficientes garantías en que situación se encuentra la calidad del aire en la zona representada por el punto de medición.

En los casos de duda ante cualquier situación los documentos de referencia serán en primer lugar la legislación nacional y en su defecto la legislación europea.

2.2.1. Almacenamiento de datos.

Una red de medición parte de unos datos validados de referencia temporal marcada por el tipo analizador o muestreador: si es automático, menor o igual a una hora y si es manual, mayor o igual a un día. El problema que surge, en primer lugar, es con qué precisión, entendida aquí, como con qué nº de decimales, se almacena esta información e intervendrá en los cálculos de agregación posteriores.

CRITERIO de almacenamiento. Un dato se almacenará, e intervendrá en la siguiente agregación si la hubiera, con un número determinado de decimales establecido de acuerdo al mínimo valor legislado (m.v.l.) para la protección de la salud (que suele ser el umbral de evaluación inferior).

- Si $m.v.l > 10$ à se almacenará número entero.
- Si $1 < m.v.l \leq 10$ à se almacenará el número con un decimal.
- Si $0,1 < m.v.l \leq 1$ à se almacenará el número con dos decimales.

- etc.

Para los contaminantes legislados actualmente:

Contaminante	Umbral de Evaluación Inferior (UEI)	Almacenamiento
SO ₂	50 µg/m ³	Entero
NO ₂	26 µg/m ³	Entero
PM ₁₀	25µg/m ³	Entero
PM _{2,5} (previsto)	12 µg/m ³	Entero
Plomo	0,25 µg/m ³	2 decimales
Benceno	2 µg/m ³	1 decimal
CO	5 mg/m ³	1 decimal
Ozono	µg/m ³ o (µg/m ³).h	Entero
Arsénico	2,4 ng/m ³	1 decimal
Cadmio	2 ng/m ³	1 decimal
Níquel	10 ng/m ³	1 decimal
Benzo(a)Pireno	0,4 ng/m ³	2 decimales

Todos los valores se redondearan al entero o decimal más próximo (si el decimal a redondear es mayor o igual que cinco se aumentara el rango anterior en una unidad). Por ejemplo; si el valor media anual de valores medios diarios de plomo es de 0,503 se redondeará a 0,50 (no superación de valor límite); si es 0,505 se redondeará a 0,51 (superación de valor límite).

Otra cuestión a señalar aquí es la hora de almacenamiento de la información:

CRITERIO para la hora de almacenamiento: Puede almacenarse en la hora que mejor convenga al Gestor de la Red para su explotación ; esta hora se comunicara siempre que envíe información (hora Universal (UTC), hora local (L) u Hora Central Europea (HCE)) y los cálculos los efectuará en referencia a dicha hora excepto los relacionados con el ozono cuya base de tratamiento será la HCE de acuerdo a la legislación:

≠ HCE = UTC + 1

≠ HCE = L-1 en verano (desde las 1 UTC del último domingo de Marzo hasta la 1 UTC del último domingo de octubre)

≠ HCE = L para invierno (resto del año)

No obstante este grupo de trabajo no puede dejar pasar la oportunidad de aconsejar almacenar toda la información horaria con referencia UTC,

2.2.2. Agregación y cálculo de datos.

En este apartado es donde las indicaciones de la legislación pueden ser más ambiguas ya que se mencionan varias que incluso pueden llegar a ser contradictorias. La mas clara se observa entre los mencionados en la tabla de objetivos de calidad de los datos (captura mínima de datos) y las mencionadas más específicamente para el contaminante ozono en criterios de agregación de datos y calculo de parámetros estadísticos.

CRITERIO para agregar datos hasta el diario: La agregación de datos hasta el dato diario se efectuará a partir del inmediato inferior siguiendo la regla del 75 % de acuerdo a la legislación:

- ≠ Dato horario: al menos el 75 % de periodo muestreado. P.e. si la Red almacena un dato cada cinco minutos se necesitara al menos 9 periodos para dar validez al dato horario; si cada 15 minutos necesitara al menos 3 periodos (este valor se redondeará de acuerdo al criterio de almacenamiento (CA)).
- ≠ Dato octohorario: al menos el 75 % de horarios; al menos 6 horas válidas (se redondeará al entero de acuerdo al CA).
- ≠ Máximo diario de medias móviles octohorario: al menos el 75 % de la posibles medias octohorarias móviles en el día. Al menos 18 medias móviles octohorarias en el día (se redondeara según el CA).
- ≠ Media diaria: al menos el 75 % de medias horarias. Al menos 18 medias horarias (se redondeara según el CA).

CRITERIO para el resto de los cálculos: Para el resto de los valores de legislación (medias anuales, superación de número de horas y/o días, valores objetivo, etc.) cuando sean necesarias las mediciones fijas (medición en continuo) el criterio general es el de DISPONER AL MENOS DEL 90 % DE LOS DATOS NO INCLUYÉNDOSE LAS PÉRDIDAS DE DATOS DEBIDAS A CALIBRACIÓN O MANTENIMIENTO DE LOS APARATOS.

La actual Guía de armonización de criterios interpretaba lo anterior diciendo que por término medio una red dedica un 5% del tiempo a dichas labores de calibración y mantenimiento de los aparatos y el criterio propuesto es de tener al menos un 86% de datos (resultado de redondear según el CA $0,90 \cdot 0,95 = 0,855$); es decir al menos 7534 datos horarios válidos o 314 diarios).

Las situaciones más ambiguas se producen para el contaminante ozono. Por ejemplo, la legislación de ozono dice que para validar el número de días de superaciones del valor objetivo de protección de la salud se dispondrá de “cinco de cada seis meses del periodo estival (abril a septiembre)”. Por tanto, primero tendremos que dar validez a un mes (el número de días de superación en un mes no es de la legislación), con el “el 90 % de los valores medios octohorarios máximos diarios (al menos 27 valores). Además para este contaminante también se tiene que cumplir los objetivos de calidad mencionados para este contaminantes de “disponer de al menos del 90% de datos no incluyéndose.....” etc. Por tanto:

SE PROPONE ADOPTAR LA REGLA DEL 86% SOBRE EL TOTAL DE DATOS POSIBLES EN LOS MESE DE VERANO , es decir, disponer de al menos de 157 días de medición en el periodo de 1 de abril a 30 de septiembre.

Para valores anuales (medias, percentiles, máximos, etc.): para dar validez a un dato se dispondrá de al menos 7534 datos horarios o de al menos 314 diarios (regla del 86%).

Medias anuales: Cuando se calcule una media anual se calculará con los datos horarios o diarios de acuerdo a la técnica patrón de referencia. Es decir, si la técnica patrón es manual, la base del cálculo será las medias diarias, si es automática, será la horaria; por ejemplo para material articulado, metales pesados y benceno, se calculará la media **anual** de valores medios **diarios**.

A continuación se mencionan algunos casos particulares (por aquello de confirmar la regla).

Para el caso particular del ozono:

- 4 **Valor objetivo de protección de la salud:** el 86 % de los posibles datos de abril a septiembre, es decir, al menos 157 valores diarios máximos octohorarios. Se podrá dar validez a este valor con al menos un año de medición de los tres necesarios.
- 4 **AOT40 de protección de vegetación:** el 86 % de datos posibles de 1 de mayo a 31 de julio entre las 8 HCE y las 20 HCE. Al menos 949 datos horarios. Para dar validez a este valor se necesitará el promedio de al menos tres años de los cinco necesarios. Así mismo se propone el aplicar la regla de corrección, y en este caso se mencionara como AOT40Cor., extendida al total de las horas posibles de medición que son de 1104 horas:

$$\text{AOT40Cor} = \text{AOT40} * 1104 \text{ horas} / n^{\circ} \text{ de horas efectivamente medidas (} \sim 949 \text{ horas)}.$$

Para el cálculo de la media legislada de 5 años se propone que se haga con el AOT40Cor, disponiendo al menos 3 años de los 5 posibles (al objeto de hacer todos los años comparables).

- 4 **AOT40 de protección de los bosques:** el 86 % de datos posibles de 1 de mayo a 30 de septiembre entre las 8 HCE y las 20 HCE. Al menos 1887 datos horarios.

Para el caso del benceno: Para el cálculo de la media anual se necesitará al menos el 86 % de una cobertura temporal del 35 %. Es decir, al menos 110 datos diarios repartidos uniformemente a lo largo del año.

Para el caso del benzo(a)pireno: Para el cálculo de la media anual se necesitará al menos el 86 % de una cobertura temporal del 33 %. Es decir, al menos 104 datos diarios repartidos uniformemente a lo largo del año.

Para el caso del arsénico, cadmio y níquel: Para el cálculo de la media anual se necesitará al menos el 86 % de una cobertura temporal del 50 %. Es decir, al menos 157 datos diarios repartidos uniformemente a lo largo del año.

Mediciones aleatorias (propuesta de Directiva): se cita textualmente la propuesta de Directiva “En el caso del benceno, el plomo y las partículas, los Estados miembros podrán efectuar mediciones aleatorias en lugar de mediciones continuas si son capaces de demostrar a la Comisión que la incertidumbre, incluida la derivada del muestreo aleatorio, alcanza el objetivo de calidad del 25 %, y que la periodicidad sigue siendo superior a la periodicidad mínima de las mediciones indicativas. El muestreo aleatorio debe distribuirse de manera uniforme a lo largo del año para evitar resultados sesgados. La incertidumbre derivada del muestreo aleatorio puede determinarse mediante el procedimiento establecido en la norma ISO 11222 (2002) “Calidad del aire – Determinación de la incertidumbre de la media temporal de las medidas de calidad del aire”. Si se efectúan mediciones aleatorias para evaluar los requisitos del valor límite de las PM_{10} , debería evaluarse el percentil 90,4 (que será inferior o igual a $50 \mu g/m^3$) en lugar del número de rebasamientos, que está muy influido por la cobertura de los datos”.

Por tanto se propone para estos contaminantes la posibilidad del muestreo aleatorio (en las condiciones establecidas anteriormente y con una cobertura temporal mayor que la mencionada para las mediciones indicativas en la tabla correspondiente). Para el caso particular del contaminante PM_{10} se calcula el percentil 90,4 para verificar si se supera más de 35 días el valor de $50 \mu g/m^3$. (Si el percentil 90,4 es mayor de $50 \mu g/m^3$ significará que puede haber más de 35

días de por encima de dicho valor y por tanto superación del valor límite; lo que no se puede saber es cuantos días exactamente).

3. CAMPAÑAS EXPERIMENTALES

Las campañas experimentales juegan un papel importante en el control de la calidad del aire. Por un lado aportan información en áreas donde no se dispone de datos históricos, y por otro lado cubren aspectos inabarcables por una red automática como son los procesos que provocan el transporte vertical de contaminantes, y que como se ha dicho influyen decisivamente en las concentraciones que se registran en superficie.

El diseño de las campañas experimentales dependerá de los objetivos perseguidos. La selección de las fechas (incluida la época del año y la duración de la campaña), de los puntos de medida (incluyendo su número y ubicación), de los instrumentos de medida en campo (unidades móviles con monitores de gases y torre meteorológica, captadores pasivos, sondeos meteorológicos, sensores remotos de gases, etc.), serán específicas para cada caso.

Este apartado se centra en los usos de las **unidades móviles** de medida en superficie, por ser la herramienta de que generalmente disponen los gestores de redes, y también se tratará la aplicación de técnicas asequibles como la **dosimetría pasiva**. En ambos casos se trata de herramientas que contribuyen al primero de los aspectos señalados, pero no al segundo (el estudio de los procesos en altura). En la medida de lo posible y por la importante influencia que tienen estos procesos en la evolución de las concentraciones en superficie, se tratarán dentro del apartado 3.2.2. otras herramientas o técnicas que se aplican al estudio de la dinámica de contaminantes.

3.1. USO DE UNIDADES MÓVILES PARA LA OPTIMIZACIÓN DE REDES.

3.1.1. Campañas experimentales para la estimación de la calidad del aire en áreas/zonas donde no exista información previa.

La existencia de huecos en la distribución espacial de estaciones de una red puede deberse a dos causas: un diseño deficiente de la red, o la existencia de áreas con niveles reducidos que no implican la medida en continuo. En el primer caso el uso de unidades móviles contribuirá a la mejora de la distribución, y en el segundo podrán servir para efectuar medidas indicativas con la

frecuencia que marca la directivas (cada 5 años o con mayor frecuencia si hay motivos para suponer que puede haber cambiado la situación), y confirmar o bien revisar la evaluación de estas zonas.

En el primer caso el procedimiento de optimización de redes expuesto en el apartado 1.1 contempla la realización de campañas experimentales en las áreas en que la cobertura de las redes presentan huecos importantes, y en las que no se dispone de información previa sobre su calidad del aire.

La opción más interesante en estos casos para los gestores de redes es recurrir a campañas de medidas con unidades móviles en emplazamientos apropiados dentro de estas áreas y durante periodos que abarquen al menos el intervalo estacional en el cual se prevén las mayores concentraciones. Los datos acumulados en estas campañas permitirán decidir sobre la necesidad de instalar sistemas de medida en continuo en estos puntos, redistribuir los puntos existentes en la zona (en ocasiones aconsejarán la modificación del mapa de zonas), o bien en el mejor de los casos, confirmarán que basta con planificar medidas estimativas para estas áreas.

Para ilustrar este apartado se expone a continuación el plan de medidas con unidades móviles que se llevó a cabo en la Comunidad Valenciana en el año 2003, después de diseñar el mapa de zonificación [ref 17] y de valorar las carencias de la red de calidad del aire en relación con dicho mapa.

"Optimización de la red valenciana de vigilancia y control de la contaminación atmosférica de la comunidad Valenciana"

Hasta la aplicación de la Directiva 96/62/CE, el modelo de evaluación de la calidad del aire que se venía aplicando se basaba en la medición continua de la contaminación atmosférica únicamente en aquellos lugares donde se presuponían niveles más elevados. Así con el paso del tiempo la Red Valenciana de Vigilancia y Control de la Contaminación Atmosférica disponía en 2001 de un total de 28 estaciones automáticas de control de la contaminación cuya distribución se puede apreciar en la figura 3.1.

Con los actuales criterios de evaluación de la calidad del aire se pretende caracterizar la calidad del aire en la totalidad del territorio, tomando como base de gestión la zonificación realizada. Este cambio en los criterios de evaluación puso de manifiesto la existencia de zonas de las que no se disponían de medidas directas y continuadas de las concentraciones de contaminantes

atmosféricos al carecer de estaciones automáticas de control de la contaminación atmosférica ubicadas en las mismas.

DISTRIBUCIÓN DE LAS ESTACIONES DE LA RED VALENCIANA DE VIGILANCIA Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.

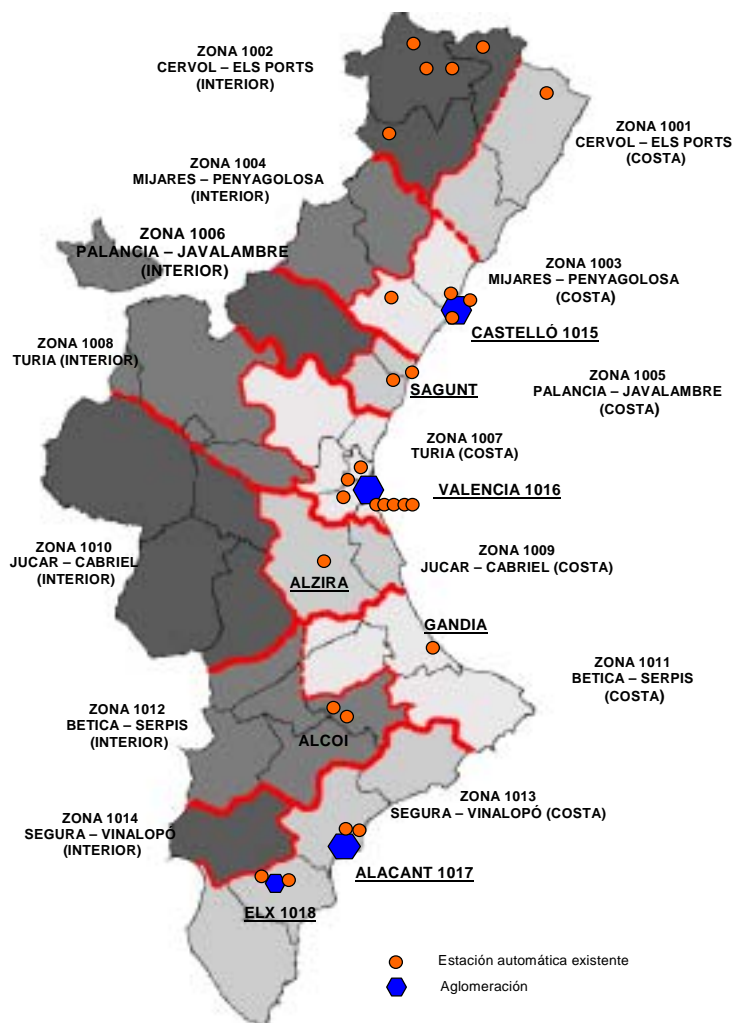


Figura 3.1: Mapa de zonas y red de calidad del aire de la Comunidad Valenciana en 2001

Por otro lado, la Directiva 96/62/CE y sus desarrollos permiten realizar la evaluación de la calidad del aire, en aquellas zonas donde se prevén niveles de los contaminantes alejados de los valores límite mediante técnicas diferentes de las medidas directas y continuadas de los contaminantes, como son los sistemas de modelización o métodos combinados de medidas directas y valores estimados objetivamente.

Para conocer la calidad del aire, en las zonas en las que nos se dispone de estaciones fijas de medida caben distintas opciones, instalación de estaciones automáticas, aplicación de un modelo

de dispersión de contaminantes que permita la estimación de los niveles registrados, uso de mediciones discontinuas representativas etc...

Así de las 14 zonas en que se ha dividido el territorio de la Comunidad Valenciana existían 5 zonas en las que no se dispone de ninguna estación fija para determinar los niveles de contaminantes, así como otras tantas en que las estaciones existentes no presentan una distribución adecuada.

Por tanto se hizo imprescindible realizar un estudio para poder dotar a la red de la estructura necesaria para poder realizar la evaluación de la calidad del aire en todo el territorio de la Comunidad Valenciana.

4 Optimización de la red:

Como paso previo a cualquier proceso de optimización se hace necesario una evaluación de las necesidades para cubrir los objetivos marcados por la normativa vigente, y de los recursos disponibles para alcanzar dichos objetivos.

Si bien todas las necesidades pueden ser cubiertas con incorporación de los recursos humanos y materiales necesarios, hay que considerar el elevado coste de dichos recursos tanto en adquisición como en mantenimiento, por lo que de forma general hay que realizar un proceso de optimización de los recursos disponibles con el objetivo de una mayor eficiencia de los recursos invertidos.

Tras el análisis de las necesidades en cada una de las zonas y los recursos existentes en la Red, se procedió a valorar las posibles opciones para dar cobertura a dichas necesidades. Como paso previo se determinó la necesidad de conocer cuales eran los niveles de los contaminantes en las zonas en las que no se disponía de datos antes de acometer cualquier solución, si bien estos niveles se habían estimado en la evaluación preliminar realizada, se consideró necesario realizar un estudio para comprobar dichos niveles.

Para ello se optó por la realización de medidas directas de forma periódica, obteniendo una serie de datos que nos permitieran evaluar la calidad del aire en cada una de aquellas zonas en las que no se disponía de información, con el fin de conocer la situación de cada una de las zonas respecto a los umbrales de evaluación.

Como primer paso, se realizó la adquisición de dos unidades móviles, dotadas de analizadores automáticos de SO₂, CO, NO, NO₂, NO_x; O₃, PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁, y un captador de partículas en suspensión que permite la determinación del contenido de metales, y sensores de dirección y

velocidad de viento, temperatura, humedad relativa, radiación solar, presión barométrica y precipitación, que podrán desplazarse a cada una de las zonas en que no se dispone de estaciones automáticas.

Como segundo paso se procedió a localizar los emplazamientos dentro de cada una de las zonas. Para ello se tuvo en cuenta que dichos emplazamientos fueran representativos de la zona a estudiar, no se encontrarán bajo la influencia directa de ninguna fuente de emisión, y contaran con una infraestructura mínima, imprescindible para garantizar el adecuado funcionamiento de las unidades móviles. Con el fin de determinar la idoneidad de los emplazamientos, desde el punto de vista de representatividad dentro de cada una de las zonas, se contó con la colaboración de la Fundación CEAM, como expertos en la dinámica de contaminantes.

Tras la selección de municipios en los cuales se podrían ubicar las unidades móviles se procedió a dotar a dichos emplazamiento del equipamiento necesario para garantizar el adecuado funcionamiento de las unidades móviles, realizándose las obras de acondicionamiento de terrenos, vallados de los recintos y dotación de suministro eléctrico. Para la realización de todas estas infraestructuras se contó con la colaboración de los Ayuntamientos implicados.

Como fruto de todo este trabajo preliminar se estableció un total de 10 emplazamientos distribuidos en aquellas zonas de la Comunidad en las que no se deponían de medidas directas, o en aquellas donde se requería un mayor conocimiento de la dinámica de contaminantes. En estos 10 emplazamientos las unidades móviles se instalarían de forma consecutiva con una frecuencia de muestreo que se aproximara al 20% del total de los datos anuales.

Antes de determinar cual era la frecuencia de muestreo se consideró necesario realizar la agrupación de aquellos emplazamientos que se encuentran en la misma cuenca aérea. También se consideró necesario que los ciclos de medida permitieran obtener datos en todas las estaciones del año, y de forma que no se repitan en años sucesivos de forma que con un periodo de varios años se disponga de un histórico de datos que comprendan la totalidad de las estaciones climatológicas dado que la mayoría de los contaminantes y variables meteorológicas siguen claras pautas estacionales.

La duración de los periodos de muestreo se eligió teniendo en cuenta los siguientes puntos:

- Ø Las unidades móviles deberían medir siempre en los mismo emplazamientos para evitar posibles interferencias de los equipos.*

- Ø La frecuencia de muestreo debería garantizar que los periodos de muestreo se realicen en distintas estaciones climatológicas.
- Ø Debe existir un desfase de forma que los periodos de muestreo no se repitan en años consecutivos, con el fin de recoger toda la variabilidad estacional.
- Ø El periodo de muestreo debe ser suficientemente largo para garantizar la estabilidad de los equipos y permitir un adecuado coordinación con los procedimientos de mantenimiento.

MAPA DE LOS EMPLAZAMIENTOS ELEGIDOS

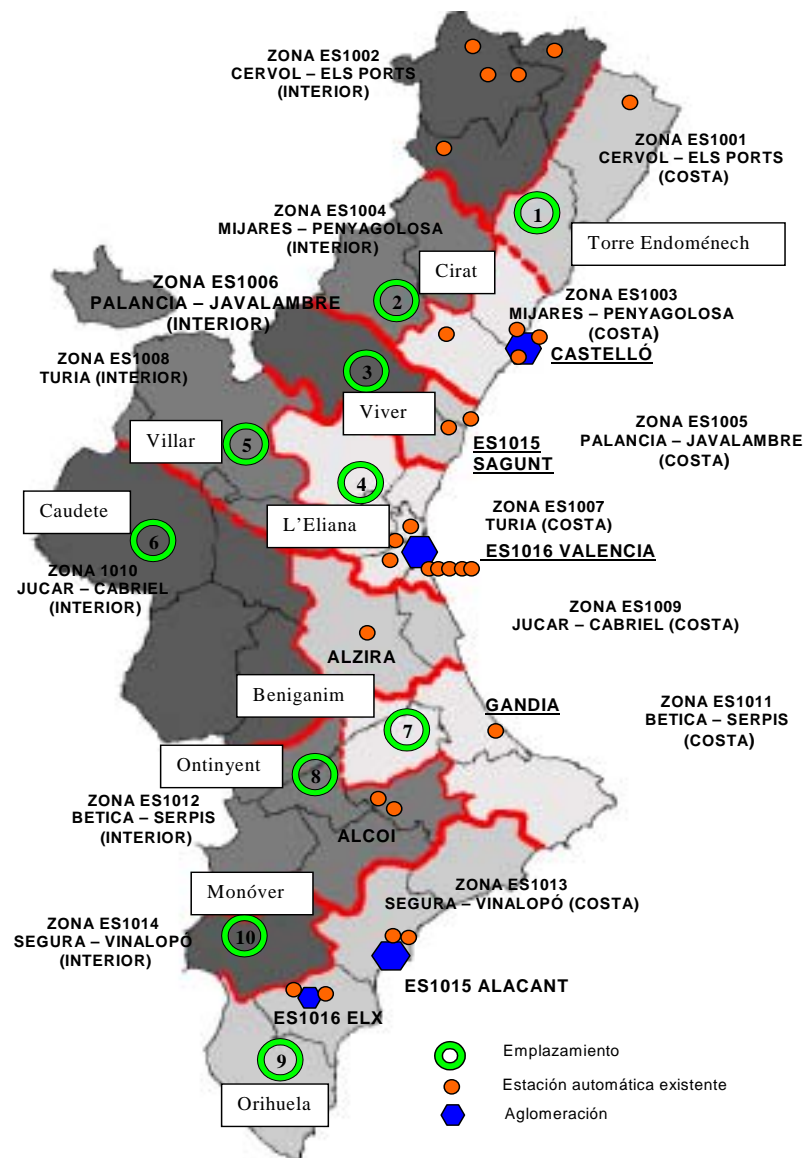


Figura 3.2: Mapa de zonas y emplazamientos para la medida con unidades móviles.

Por tanto, tras la consideración de todos estos puntos, se procedió a elaborar un calendario de muestreo con un periodo de 28 días de medida en cada uno de los emplazamientos, de forma que se dispondrían de entre 2 y 3 periodos de mediciones anuales. Estos periodos representan entre 56 y 84 días de medición que representan entre un 15 % y 23 % sobre en promedio anual.

A continuación se muestra un ejemplo del calendario diseñado para la explotación de las unidades móviles.

Fecha inicio	Fecha fin	Ontinyent - Bemigamim	Monòver - Torre Endomenech	Orihuela - Cirat	Caudete. Viver	Villar - L'Eliana
31/03/2003	28/04/2003					
28/04/2003	26/05/2003					
26/05/2003	23/06/2003					
23/06/2003	21/07/2003					
21/07/2003	18/08/2003					
18/08/2003	15/09/2003					
15/09/2003	13/10/2003					
13/10/2003	10/11/2003					
10/11/2003	08/12/2003					
08/12/2003	05/01/2004					
05/01/2004	02/02/2004					
02/02/2004	01/03/2004					
01/03/2004	29/03/2004					
29/03/2004	26/04/2004					
26/04/2004	24/05/2004					
24/05/2004	21/06/2004					
21/06/2004	19/07/2004					
19/07/2004	16/08/2004					
16/08/2004	13/09/2004					
13/09/2004	11/10/2004					
11/10/2004	08/11/2004					
08/11/2004	06/12/2004					
06/12/2004	03/01/2005					
03/01/2005	31/01/2005					
31/01/2005	28/02/2005					
28/02/2005	28/03/2005					
28/03/2005	25/04/2005					
25/04/2005	23/05/2005					
23/05/2005	20/06/2005					
20/06/2005	18/07/2005					
18/07/2005	15/08/2005					
15/08/2005	12/09/2005					
12/09/2005	10/10/2005					
10/10/2005	07/11/2005					
07/11/2005	05/12/2005					
05/12/2005	02/01/2006					
02/01/2006	30/01/2006					

4 Conclusiones:

Tras los resultados obtenidos en los muestreos realizados con las unidades móviles se obtuvo como conclusión la necesidad de medir en continuo los niveles de ozono en los 10 emplazamientos de las unidades móviles ya que durante los periodos de muestreos se registraron valores muy elevados que en algunos casos superaron el umbral de información.

Por tanto se adoptó la decisión de ampliar la Red Valenciana de Vigilancia y Control de la Contaminación Atmosférica con la instalación de 10 estaciones de vigilancia del ozono troposférico, ubicadas en cada uno de los emplazamientos diseñados para el muestreo con unidades móviles, de forma que dichos emplazamientos se han constituido como estaciones de vigilancia y aportan información en continuo de los niveles de ozono troposférico.

3.1.2. Campañas experimentales para el estudio de la representatividad de los puntos de medida.

Como paso previo al diseño de la campaña, es muy recomendable un estudio basado en la explotación de las bases de datos históricas disponibles. Este estudio respondería al procedimiento propuesto en el apartado 1.1, y permitiría plantear la campaña sobre una base de conocimiento mayor, y por tanto con ideas más claras para la planificación de las fechas, duración, tipo de medidas a realizar, y los puntos de medida durante la campaña.

De forma muy resumida este análisis previo consiste en reunir toda la información sobre los factores que contribuyen a la presencia de contaminantes en la zona, fundamentalmente serían los siguientes:

- 1) identificar las fuentes de emisión, dentro de la zona o de zonas vecinas, que pueden aportar niveles de contaminantes a la zona, y
- 2) determinar la evolución estacional del campo de vientos en la zona y las rutas de transporte habitual de la masa aérea dentro de la zona. Para ello generalmente contaremos con las series de datos históricas de las redes de calidad del aire y, muy importante, series de datos de redes de torres meteorológicas que mejoren la cobertura de las redes de calidad.

Con esta información el primer paso consiste en un análisis de las rosas de viento separando las componentes estacionales (una rosa por mes si se dispone de varios años, o si no una por trimestre como mínimo), y separando la componente nocturna de la diurna. Si la densidad de torres es suficiente el análisis de estas rosas permite identificar la continuidad de los vientos, y

dará información valiosa sobre las rutas de transporte habitual en la zona, y su probable variación estacional. El cálculo las series diarias de los parámetros L y S a partir de los registros de velocidad y dirección del viento ayudará al establecimiento de hipótesis sobre el alcance de esas circulaciones. Posteriormente la superposición de la orografía a dichas rosas, y un mínimo conocimiento de los forzamientos orográficos, permitirá refinar estas hipótesis. Y finalmente la distribución de las fuentes de emisión identificadas permitirá completar el paquete de hipótesis con que abordar la campaña. En este punto hay que tener en cuenta que las rosas procedentes de torres situadas en el entorno de las áreas de emisión identificadas dará una primera idea de las áreas de influencia de cada una de ellas dentro de la zona (en particular para las fuentes de emisión externas a la zona se podrá confirmar si efectivamente es razonable suponer un impacto dentro de la zona), y por su parte las rosas de puntos dentro de la zona permitirán identificar el área dentro del cual la presencia de emisiones puede acabar influenciando las concentraciones en dicho punto. En todo este análisis la densidad de torres meteorológicas permitirá un mayor o menor reconocimiento de la continuidad de las circulaciones de viento y en consecuencia una mayor o menor precisión en el reconocimiento de las rutas de transporte habitual de la masa aérea dentro de la zona..

Con este estudio plantearíamos una campaña con los siguientes objetivos:

- 1) Recoger datos de las variables meteorológicas en superficie en donde no se dispusiera de ellos durante la fase de análisis previa (incluyendo áreas interiores de la zona y en las áreas de emisión que presumiblemente afectan a la zona, dentro o fuera de ella). Esta información serviría para abundar en el análisis anterior rellenando los posibles huecos identificados.
- 2) Realizar medidas de concentraciones con las unidades móviles a lo largo de las rutas de transporte de la masa aérea identificadas, en puntos adecuados entre las áreas de emisión hasta los extremos donde alcancen las circulaciones, para estudiar los gradientes de concentraciones a lo largo de ellas.
- 3) Realizar medidas en las áreas de la zona que puedan quedar fuera de estas rutas de transporte para conocer y confirmar los niveles presumiblemente más bajos.
- 4) Uso de las herramientas / técnicas de medida alternativas para mejorar el conocimiento del campo de concentraciones. De no contar con ellas el único recurso será la interpolación de los datos obtenidos con los monitores en continuo de las UM con objeto de delimitar las áreas de mayor concentración.

En todos los casos es fundamental escoger fechas adecuadas y establecer una duración suficiente para recoger datos representativos de los escenarios de dispersión que se han caracterizado para la zona en la fase previa de análisis. La posibilidad de contar con más de una UM para realizar medidas simultáneas es altamente recomendable.

A continuación, sobre la base de todo lo comentado en el apartado 1.2, se ilustra esta aplicación mediante un ejemplo práctico muy simple.

Consideremos una zona relativamente plana con un área urbana o industrial importante situada más o menos en el centro (una aglomeración que como tal estaría separada de la zona de estudio), y sin otras emisiones importantes que le puedan afectar desde las zonas vecinas. Tenemos una cabina con torre meteorológica situada al este del área urbana de la que queremos averiguar su área de representatividad dentro de la zona.

Supongamos que el análisis de las rosas de viento de varios años muestran predominio vientos de componente E en verano durante el día que giran a S durante la noche, con un alcance diurno (parámetros L y S) que sobrepasa los límites occidentales de la zona. Y en invierno la circulación dominante es del sistemáticamente del W.

Primera hipótesis:

1) En invierno se tendrán niveles mas o menos significativos de contaminantes primarios dentro de la zona a distancias de unos pocos kilómetros hacia el E de la ciudad. Dependiendo de la distancia a que se encuentra la cabina esta detectará o no concentraciones fundamentalmente de NO₂ , CO y PMs que en principio no supondrán la superación de los valores límite y objetivo (se confirma con los datos) y esta misma situación se puede suponer para el resto de la zona. No hay por tanto problemas de representatividad de la cabina en la zona durante los meses de invierno.

2) En verano las emisiones del tráfico durante el día son transportadas hacia el W por lo que se esperan concentraciones más altas de ozono en esa dirección de las que está midiendo la cabina. Supongamos que la cabina mide valores que sitúan a la zona en el intervalo de cumplimiento de los valores objetivo (si no fuera así se trata de un hallazgo que nos debe hacer revisar el primer análisis de la situación en cuanto a la posible influencia de emisiones más distantes, o de procesos de transporte vertical con los que no contábamos, y esto nos llevaría a una campaña de medidas aun más exhaustiva y con objetivos ampliados).

Se trata de confirmar si la misma situación de niveles por debajo del valor objetivo se está cumpliendo en el área al W de la ciudad. Para ello se diseñaría una campaña de medidas en los

meses de verano a lo largo de uno o varios transectos que permitieran caracterizar los campos de concentración de ozono a lo largo de la ruta de transporte dentro de la zona. La campaña debe de permitir el cálculo/estimación de los valores de AOT40, y superaciones del valor objetivo en ese área.

3.2. OTRAS TÉCNICAS DE MEDIDA COMPLEMENTARIAS.

3.2.1. Campañas de dosimetría pasiva para estudio de la distribución espacial de concentraciones.

En este apartado se ilustra el uso de esta herramienta mediante la presentación de un caso práctico consistente en la *"Optimización de redes de vigilancia a partir de campañas con captadores difusivos en Andalucía"*

La Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía ha llevado a cabo una serie de campañas con captadores difusivos con el objetivo de optimizar la Red de Vigilancia en los principales núcleos urbanos de Andalucía. Esto ha permitido situar las estaciones en las ubicaciones más adecuadas, asegurando así la representatividad de los valores obtenidos.

Materiales y método: Los dispositivos de toma de muestra, generalmente con forma de tubo o disco, captan los contaminantes atmosféricos mediante la absorción en un sustrato químico seleccionado, específico para el contaminante que se desea determinar.



Figura 3.3: Captador difusivo.

En cada ubicación donde se sitúa un captador, se realizan una serie de medidas a lo largo del año, de forma que queden representado el comportamiento anual de los contaminantes. Este comportamiento viene muy influenciado por las condiciones meteorológicas y por los diferentes ciclos productivos y de emisión que pueden sucederse. Generalmente, una campaña de muestreo está formada por seis periodos de medida en invierno y otros tantos en verano.

Después de la exposición durante un periodo de muestreo que se suele situar en el entorno de las dos semanas, la muestra es enviada al laboratorio, donde se realiza la extracción del contaminante y su posterior análisis cuantitativo. Las técnicas analíticas a utilizar en función del contaminante se muestran en la siguiente tabla.

Contaminante	Técnica analítica
NO ₂	Espectrofotometría UV-visible
SH ₂	
SO ₂	Cromatografía iónica
O ₃	

La incertidumbre esperada en la medida se sitúa en el entorno del 10 % para todos los contaminantes, a excepción del ozono, que puede situarse en el 20 %. Se muestra en la siguiente tabla los factores externos que afectan a la difusión y, consecuentemente, intervienen en la incertidumbre de la medida.

	Partículas	Velocidad del viento	Presión y temperatura	Luz solar	Humedad	Concentración variable	Nº de especies
Gradiente de concentración		X				X	
Capacidad de absorción	X				X		X
Difusividad	X	X	X		X		X
Estabilidad de la muestra				X			
Analítica	X			X			

Los compuestos que pueden ser determinados con esta técnica incluyen los principales contaminantes propios de entornos urbanos, como O₃, NO₂, SO₂, NH₃ y COVs.

Para mejorar la calidad de los resultados, se colocan tubos por duplicado en varias ubicaciones para determinar la reproducibilidad de las medidas. Es admisible una diferencia máxima de entre 5 y 8 % entre las medidas obtenidas en la misma ubicación.

Dadas las pequeñas cantidades de masa (ng) recogidas por los captadores difusivos en los muestreos medioambientales, es fundamental conocer las cantidades de fondo asociadas al propio captador. Con este fin se colocaron una serie de tubos como blancos de campo. Estos captadores no se exponen a la atmósfera contaminante. Suele utilizarse un 10 % de captadores duplicados y otro 10 % de blancos de campo.

Adicionalmente, se utilizan los valores registrados en las estaciones de las redes de vigilancia que quedan incluidas en el área de estudio para realizar la comparación de resultados entre ambos métodos.

Ventajas y limitaciones del método: *Las principales ventajas de la captación difusiva son su simplicidad y su bajo coste. Pueden utilizarse una gran cantidad de unidades de forma simultánea, por lo que se obtiene así información acerca de la distribución espacial de los contaminantes. Mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica (GIS), es posible interpolar espacialmente la información obtenida, asignando a toda el área de estudio un valor de contaminación a partir de las mediciones realizadas.*

Las ubicaciones en las que se sitúan no necesitan de alimentación eléctrica ni de protección de intemperie. Además, no se precisa calibración “in situ”. Estas ventajas posibilitan la medida de la contaminación en zonas alejadas de núcleos habitados.

Los métodos analíticos para determinar la cantidad absorbida son conocidos y estandarizados. Su incertidumbre asociada está estudiada y debe ser garantizada por el fabricante, ya que en la operación no se introducen más factores que los derivados de la falta de representatividad del punto de muestreo.

Esta técnica presenta una importante ventaja al ser utilizada en combinación con otras metodologías, como los muestreadores activos o los analizadores automáticos. En este tipo de estudios combinados, el captador pasivo ofrece los datos de calidad del aire con resolución geográfica, mientras que los otros instrumentos suministran información relacionada con las variaciones diurnas de la concentración y sus valores máximos.

Como principales inconvenientes, debe citarse que esta técnica de medida no es conveniente para muestreos de corta duración. Es decir, el resultado obtenido va a ser una media de todo el tiempo de exposición, que como se ha comentado, se sitúa en torno a los 15 días. No obstante, la estimación de tiempos de integración de plazo inferior puede realizarse acudiendo a métodos

estadísticos que tengan en cuenta la distribución de frecuencias de diferentes medidas en cada punto.

Asimismo, esta técnica no permite la obtención de datos en tiempo real y su uso se limita a contaminantes gaseosos.

Optimización de la red: Como se ha comentado anteriormente, el objetivo de las campañas en entornos urbanos y suburbanos es la medición de los contaminantes que son emitidos en un determinado núcleo urbano o industrial y cómo se distribuye esa contaminación en su entorno más próximo.

Gracias al estudio de las superficies generadas por las técnicas GIS a partir de las medidas realizadas, es posible analizar en profundidad el comportamiento de los contaminantes. Así, en el caso de núcleos urbanos, presenta especial interés el estudio del dióxido de nitrógeno. Como contaminante primario, las mayores concentraciones deben registrarse en las cercanías de las fuentes de emisión. El tráfico rodado es el principal responsable de sus emisiones, por lo que los valores máximos se registran en los centros urbanos.

En zonas industriales, resulta de interés el estudio de otros contaminantes, como el dióxido de azufre o el ácido sulfhídrico. La elección de los contaminantes a determinar vendrá condicionada por los procesos productivos presentes en las industrias cercanas. Al igual que en el caso del dióxido de nitrógeno, la distribución esperada de los contaminantes industriales será mayor en las proximidades de los procesos productivos.

A diferencia de los contaminantes primarios, las mayores concentraciones de ozono se registran en las afueras del núcleo urbano, en la dirección de los vientos predominantes. Se produce un fenómeno de transporte y reacción de los precursores del ozono que se registran en el centro del núcleo urbano, que se traduce en un aumento de la concentración de este contaminante secundario en las afueras.

Los muestreadores se deben situar en ubicaciones representativas de la concentración de contaminantes en su entorno. Así, a partir de una serie discreta de puntos con valores conocidos, se podrá determinar la concentración en toda la zona de estudio, interpolando la información a los puntos en los que no se ha realizado medida alguna mediante la aplicación de la teoría estadística espacial.

Para seleccionar la localización de los captadores difusivos, se recurre al empleo de los Sistemas de Información Geográfica. Los criterios de ubicación se implementan en estos sistemas para obtener aquellas ubicaciones que son susceptibles de albergar un captador difusivo.

Hay diferentes criterios de ubicación que deben ser contemplados. En primer lugar, se encuentran los que hacen referencia a las distancias mínimas a las principales fuentes de contaminación. Para evitar la determinación de la concentración que directamente es emitida por el foco contaminante, los captadores difusivos se separan suficientemente. Esto permite medir la contaminación una vez que haya ocurrido un proceso dispersión en el aire ambiente, obteniendo así una medida más representativa.

Por otro lado, es posible catalogar todo el territorio en función de los usos del suelo, atendiendo a las características del mismo y a la función a la que está siendo sometido. Es necesario tener en cuenta que no todos los usos del suelo son válidos para ubicar un captador difusivo. Del análisis inicial es necesario descartar aquellas porciones de territorio que no pueden ser consideradas, como las zonas húmedas, los aeropuertos o las zonas con equipamiento deportivo, por citar algunas de ellas.

Con objeto de tener en cuenta la influencia de las condiciones meteorológicas en los niveles de contaminación, se han realizado dos campañas de medida, una en invierno y otra en verano. La gran diferencia de concentraciones que cabría esperar entre ambas campañas para el contaminante ozono hace que éste sólo haya sido medido en verano. Cada una de estas campañas consta de unos seis periodos quincenales de medida repartidos de forma que sean representativos de la evolución anual.

En función de la extensión de la zona a controlar, se plantea la necesidad de utilización de un determinado número de captadores difusivos. Un número más elevado de captadores asegura una mayor exactitud en el resultado final, ya que, al aumentar el número de puntos en los que se dispone de medida, menor será el radio de representatividad asignado a cada captador difusivo para que abarque a toda el área de estudio. Ello se traduce en que será menor el error cometido a la hora de interpolar los valores para asignar a cada punto del espacio un valor de contaminación a partir de los valores obtenidos en las ubicaciones medidas.

Por el contrario, al aumentar el número de captadores difusivos, los costes asociados a la medición aumentan considerablemente. Se necesita un mayor potencial humano que se encargue de la colocación y recogida de los captadores, y un mayor número de mediciones en el laboratorio. Puede llegarse a un compromiso que se sitúa en un captador entre 1 y 3 km².

En el Anexo VIII del R. D. 1073/2002 se hace referencia a la ubicación de los puntos de muestreo para la medición de las concentraciones de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas, plomo, benceno y monóxido de carbono en el aire ambiente. Asimismo, el R. D. 1796/2003 realiza indicaciones similares en cuanto al contaminante ozono. En dichas referencias legales se indica que los puntos de muestreo orientados a la protección de la salud humana deberán estar situados de manera que:

- § Proporcionen datos sobre las áreas situadas dentro de las zonas y aglomeraciones que registren las concentraciones más altas a las que la población puede llegar a verse expuesta, directa o indirectamente, durante un período significativo en comparación con el período de promedio utilizado para el cálculo del valor o valores límite.*
- § Suministren datos sobre las concentraciones registradas en otras áreas dentro de las zonas y aglomeraciones que son representativas de la exposición de la población.*

A partir de la información obtenida con la interpolación espacial de los resultados de los captadores difusivos, las estaciones de la Red de Vigilancia son ubicadas en aquellas porciones del territorio en donde se registran los niveles más altos de contaminación, siempre que se considere que dicho emplazamiento es representativo de la zona a estudiar y no se encuentra excesivamente influenciado por condiciones locales.

Ejemplos: *Se presentan a continuación algunos ejemplos obtenidos con las campañas comentadas.*

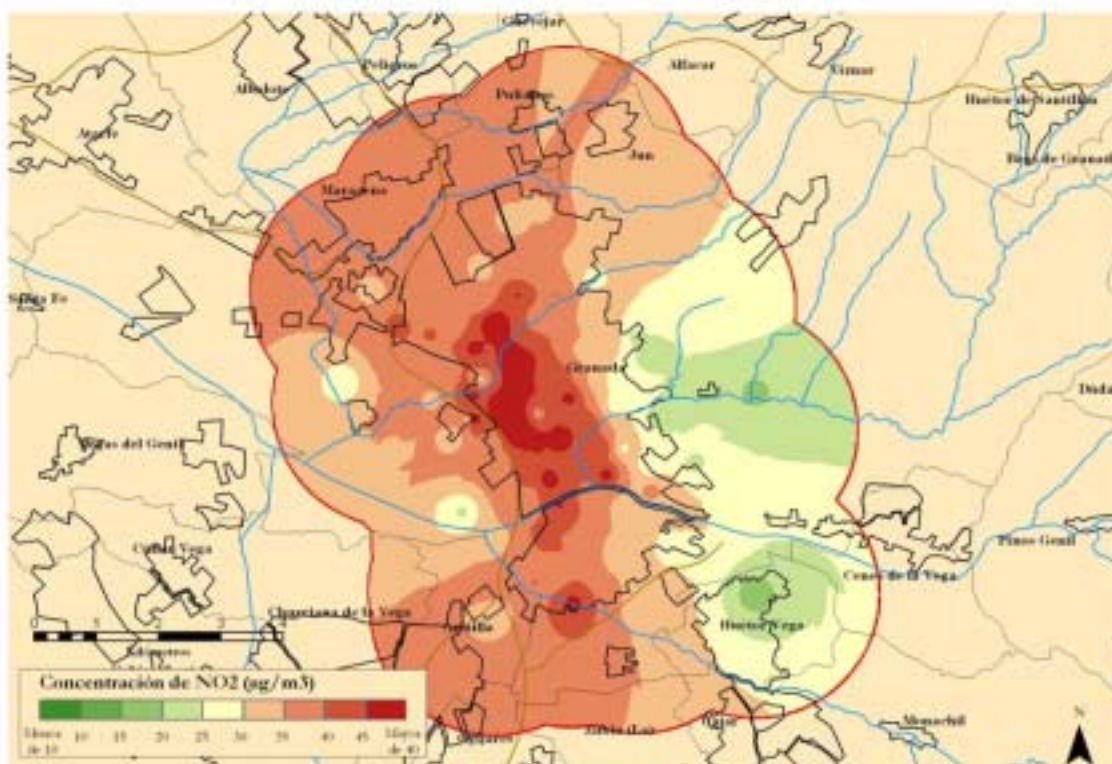


Figura 3.4: Concentración de NO₂ obtenida en Granada.

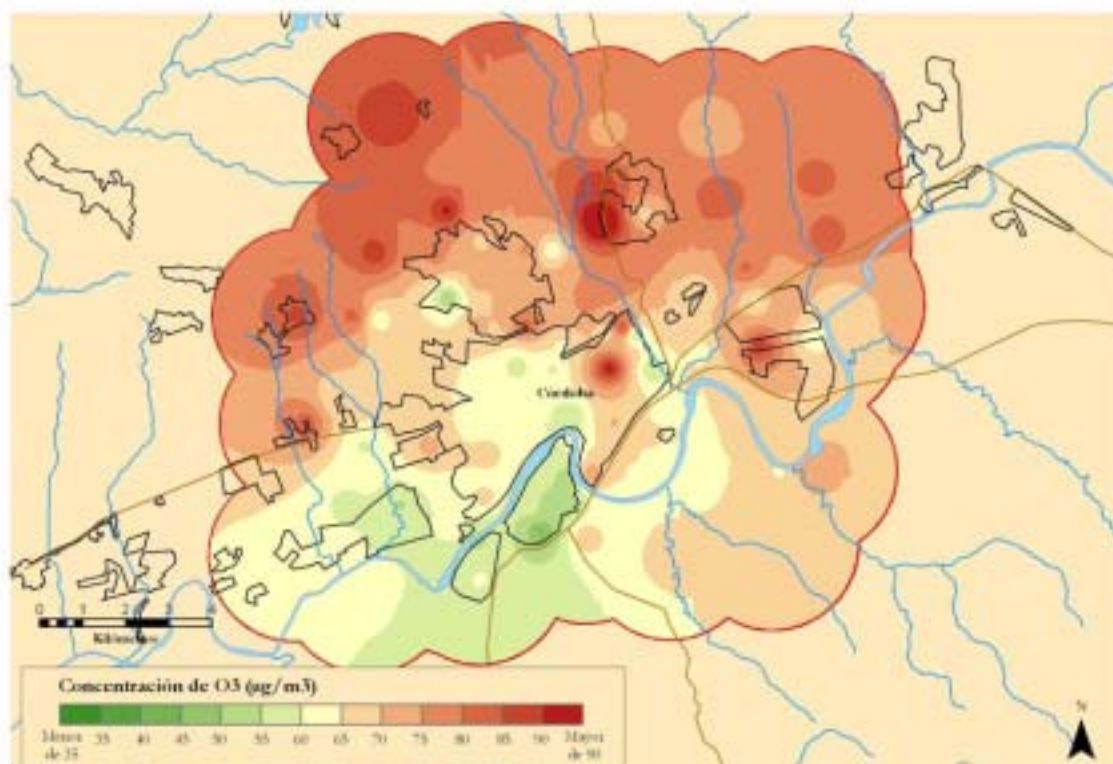


Figura 3.5: Concentración de ozono obtenida en Córdoba.

Los mapas obtenidos para las diferentes localidades estudiadas han servido de base para la optimización de la Red de Vigilancia y Control de la Calidad del Aire en Andalucía.

Referencias

- Lozano García, A. "Optimización del Diseño de Redes de Vigilancia y Control de la Calidad del Aire y su Aplicación en Andalucía". Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla (España), 2004
- Martínez, A. P. et al.; "Introducción al Monitoreo Atmosférico"; ECO/OPS, México, 1997
- Palmes, E. D. et al.; "Personal sampler for nitrogen dioxide"; Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 1976
- Ogawa; "NO, NO₂, NO_x and SO₂ sampling protocol using the Ogawa sampler"; Ogawa&Co., USA, Inc, 1998
- Ogawa; "Protocol for ozone measurement using the ozone Passive sampler badge"; Harvard School of Public Health. Ogawa&Co., USA, Inc., 2001
- Varios; "Ozone Position Paper"; Working Group on Ozone Directive and Reduction Strategy Development, 1999

3.2.2. Obtención de Información complementaria sobre parámetros que no se miden de forma rutinaria.

Las redes de vigilancia de la calidad del aire cuentan con instrumentación de medida de contaminantes atmosféricos, y muchas de ellas miden también variables relacionadas con el estado de la atmósfera (variables meteorológicas).

Estas estaciones, distribuidas en un área geográfica delimitada por el ámbito territorial de la red, presentan la gran ventaja de ofrecer una gran cobertura temporal ya que funcionan de manera continua. Frente a éste hecho se encuentra el inconveniente de que proporcionan una información que en algunas ocasiones resulta insuficiente para conocer determinados aspectos del fenómeno de la contaminación atmosférica. Mientras en unos casos, la ausencia de información apunta a la necesidad de obtener medidas de otras especies o variables que intervienen en los procesos químicos, en otros, se desprende una clara limitación en cuanto a la cobertura espacial, derivada del número fijo de estaciones existente en el territorio y/o la complejidad de éste. Otro aspecto muy importante a tener en cuenta, es el hecho de que las estaciones tan solo suelen recoger información de superficie y muy próxima al suelo, por lo que el desconocimiento de lo que ocurre en la dimensión vertical, puede llevar a una interpretación incompleta o incorrecta sobre las relaciones causa-efecto y los fenómenos que influyen en las observaciones que se registran en la estación.

En los últimos años las técnicas de observación atmosférica y de adquisición, almacenamiento y transmisión de datos relativos a variables meteorológicas, composición química y propiedades de la atmósfera han experimentado una notable evolución. En la actualidad estas técnicas pueden agruparse en dos grandes bloques: las técnicas de medida directa y las técnicas de detección remota.

≠ Medidas directas

Dentro del primer grupo se encuentra la instrumentación que normalmente opera de manera continua en las estaciones de medida, con objetivos de vigilancia y control de la calidad del aire. Frente a estos equipos basados en técnicas más o menos estándar nos encontramos otros sistemas que proporcionarían información complementaria ya que permiten monitorizar otras propiedades o especies no sujetas a regulación normativa legal. Es el caso por ejemplo, con relación al material particulado de propiedades como distribución granulométrica, en términos de número de partículas o de masa, o concentración de determinadas especies en fase particulada, como nitrato, sulfato, o las fracciones de carbono elemental y orgánico. Estas técnicas,

generalmente utilizadas en actividades de investigación son de gran utilidad a la hora de interpretar las contribuciones de las distintas fuentes de materia particulada en la atmósfera. Asimismo, existe en el mercado un amplio abanico de muestreadores y captadores que permiten obtener una muestra representativa de aire aplicando criterios diferentes de discriminación (cabezal de corte, denuders, impactadores en cascada) y que se utiliza como apoyo en la interpretación final de los análisis de aire ambiente que se realizan posteriormente en laboratorio.

Como complemento a estas observaciones con medidas directas que se realizan en superficie, existen sistemas que permiten obtener medidas puntuales en altura o perfiles de evolución vertical. Esto se consigue mediante medidas en instalaciones o plataformas a alturas fijas o predeterminadas, o bien transportando o elevando la instrumentación necesaria. Es el caso de los sistemas de sondeo atmosférico, muy utilizados en meteorología, y basados en el uso de globos cautivos o libres como elementos soporte de la instrumentación. Estos equipos están conectados por radio con la estación base en tierra y van proporcionando continuamente la información que registran los sensores a la altura a la que éstos se encuentran. El sistema de globo cautivo tiene un techo limitado (1000 o 2000 m) al estar el globo físicamente ligado a tierra, pero el sistema de globo libre puede alcanzar la estratosfera. Ambos proporcionan información termodinámica en tiempo real sobre la estructura vertical atmosférica existente en el lugar de estudio, y aunque su aplicación más generalizada es la meteorológica también admiten ser completados con algunos sensores adicionales capaces de caracterizar las concentraciones de ciertos compuestos en el aire, como por ejemplo ozono.

Por último no conviene olvidar los sistemas instrumentales meteorológicos basados también en la obtención de medidas directas, pero desligados totalmente de las estaciones de superficie. Se trata de los aviones-laboratorio que, como plataformas de medida aerotransportadas, permiten obtener una gran cantidad de información sobre los campos de diversas variables meteorológicas y composición química cubriendo radios de acción muy amplios en tiempos razonablemente cortos. Esta instrumentación ofrece rendimientos científicos muy interesantes, aunque también presenta limitaciones de uso tanto de tipo técnico como económico.

≠ **Medidas por detección remota**

Con respecto al grupo de los sistemas de detección remota, y en el caso de aplicaciones meteorológicas podemos distinguir esencialmente dos tipos: los sistemas acústicos de efecto doppler, y los radares meteorológicos. Los primeros basan su funcionamiento en la dependencia de la propagación del sonido por la atmósfera con las condiciones físicas. De este modo, a partir de la observación de los efectos que se producen sobre la frecuencia de una determinada señal

acústica introducida en una cierta región de la atmósfera, estos sistemas permiten inferir la estructura termodinámica (perfil de temperatura, distribución de densidad, presencia e intensidad de flujos de aire, etc.) en las capas bajas de la troposfera. Por otro lado, los radares meteorológicos, mediante complejos programas de tratamiento de señal, permiten obtener información sobre la estructura de la región atmosférica que exploran a partir del análisis de las perturbaciones que ésta genera sobre una determinada señal electromagnética, siendo su principal resultado la obtención de campos de temperatura y viento.

En el campo de las aplicaciones para la caracterización de especies químicas merece la pena destacar la irrupción de las técnicas de teledetección óptica y su desarrollo específico para la medida de constituyentes atmosféricos. Estas técnicas físicas de detección remota se basan en los efectos de la interacción radiación electromagnética / materia, siendo en este caso la luz el vehículo de información. La gran ventaja de estos sistemas consiste en que, al no precisar ningún tipo de muestreo, permiten obtener información química de parcelas de aire alejadas del punto de observación. Atendiendo al origen de la luz empleada en la medida, estas técnicas pueden clasificarse en dos grandes grupos, las denominadas técnicas pasivas y las activas. Cuando la luz es de origen natural (sol, luna, infrarrojo térmico...), estamos en el primer grupo, y cuando la radiación es artificial (láser, lámparas...), en el segundo. Cada tipo tiene sus ventajas e inconvenientes y en general suelen ser instrumentos complementarios.

La mayoría de los sistemas pasivos, por ejemplo, pueden operar en modo estático o en movimiento, pero no suelen proporcionar información resuelta espacialmente sino valores de concentración de contaminantes integrados linealmente a lo largo de un camino óptico más o menos claro. Ejemplo típico de estos sistemas es el de los sensores pasivos que analizan la radiación solar en busca de absorciones específicas de contaminantes atmosféricos y que pueden viajar a bordo de satélites artificiales, o ser utilizados desde la superficie en vehículos, o estar fijos en tierra. Ejemplos de estos sistemas son los espectrómetros tipo COSPEC [18], los instrumentos DOBSON, Brewer, TOMS, etc.

Los sistemas activos, cuentan con la ventaja de controlar su fuente de radiación luminosa y en ello cifran su potencial. En los casos en que el instrumento utiliza algún tipo de fuente incoherente (lámpara, etc) el equipo suele facilitar, casi simultáneamente, las concentraciones promedio de numerosos compuestos medidos en un camino óptico de centenares de metros (sensores DOAS, FTIR, etc.). Por el contrario, en los casos en que el instrumento emplea fuentes láser pulsadas las determinaciones suelen realizarse para uno o dos compuestos a lo largo de varios kilómetros,

pero la medida está resuelta espacialmente lo que permite obtener perfiles de distribución vertical (sistemas LIDAR, DIAL).

Finalmente, el lanzamiento de satélites al espacio, ha permitido situar sensores remotos a grandes distancias de la superficie terrestre, posibilitando la disposición de estaciones de observación meteorológica y de otras variables como algunas especies químicas o carga de polvo en órbitas geoestacionarias o con cobertura global, lo que proporciona una visión completa del desarrollo y evolución de los fenómenos atmosféricos a escala planetaria. El análisis de imágenes de satélite en las diferentes bandas del espectro electromagnético, ha supuesto un avance revolucionario para el conocimiento del estado de la atmósfera, un medio continuo en el que las escalas y fenómenos están claramente interconectados, por lo que esta información es en muchos casos imprescindible para comprender y analizar un fenómeno y predecir su evolución. Un ejemplo de este tipo de aplicaciones es el sistema de predicción de intrusiones de polvo africano que se utiliza para la evaluación de la contaminación atmosférica por material particulado en España (<http://www.calima.ws/>)

4. OTROS ASPECTOS RELACIONADOS CON LA OPTIMIZACIÓN DE LAS REDES

La gestión de la calidad del aire regulada por la directiva marco y sus derivadas consiste fundamentalmente en su **evaluación** siguiendo los criterios y los métodos apropiados en cada zona, en la **información al público** sobre su estado en relación con los parámetros de calidad allí definidos, y su **control** dentro de estos parámetros, y en los plazos también allí señalados, mediante la implementación de planes de acción a corto y largo plazo. En España esta gestión es una competencia de las CCAAs, por tanto son estas las responsables de que todas las tareas relacionadas con estos tres aspectos se lleven a cabo correctamente.

Como ya se comentó en la introducción para todo ello se necesitan además **recursos técnicos y humanos especializados**. Esto implica una dotación económica suficiente para la adquisición y mantenimiento de los equipos necesarios, y la consolidación de equipos de trabajo que incluyan técnicos con cierto grado de experiencia en las prácticas asociadas al manejo y análisis e interpretación de datos con herramientas adecuadas.

En relación con el aspecto económico el apartado 4.1 plantea la necesidad de involucrar a la industria en la evaluación de la calidad del aire, y en particular la integración de las redes privadas de control de la calidad del aire. Y en relación con la consolidación de equipos de trabajo expertos, en el apartado 4.2. se traslada al documento el debate interno en el grupo de trabajo sobre dos modelos posibles del sistema de gestión: la creación de centros de gestión públicos dentro de la administración dotados de todos los recursos técnicos y humanos para llevar a cabo todas las tareas relacionadas con la gestión, o bien, la administración se apoya en instituciones independientes (universidades, centros de investigación, consultorías, etc.) con capacidad probada para llevar a cabo las tareas encargadas.

Cualquiera de ellos puede conformar un sistema de gestión óptimo. Dentro de este grupo de trabajo no se considera que a priori ninguno de los dos modelos sea mejor que el otro, y comunidades representadas dentro del grupo como Andalucía, Cantabria, Comunidad Valenciana o Murcia gestionan su calidad del aire siguiendo uno u otro (o una mezcla de ambos). En cualquiera de los casos lo fundamental es que tareas, rutinarias o puntuales, implicadas en la gestión de la calidad del aire, entre ellas las abordadas en este documento, que requieren un enfoque no solo técnico sino también científico, deben ser realizadas por personal especializado y con experiencia.

4.1. OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA DE LAS REDES DE VIGILANCIA. INTEGRACIÓN DE LAS REDES PRIVADAS EN LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE.

La parte económica, como en cualquier actividad de hoy, es esencial para garantizar el funcionamiento de estas costosas infraestructuras de vigilancia ambiental, mas aún si cabe en las redes de vigilancia atmosférica, debido a la instrumentación que se utiliza, basada en analizadores automáticos y en continuo, que requieren un mantenimiento, calibración y revisión permanente para poder garantizar las exigencias de calidad impuestas en estas redes. Unido a esto, estas instalaciones están esparcidas por el territorio a fin de poder representar la totalidad de las zonas y criterios de vigilancia, lo que encarece aún más estas tareas. Por último no hay que desdeñar los gastos que conllevan las comunicaciones entre las estaciones y los centros de recepción y el mantenimiento de los mismos.

Independientemente de la asignación presupuestaria que dispongan estos sistemas de vigilancia, la mayoría de las veces es escasa y sufre a menudo los avatares de recortes presupuestarios que impiden su adaptación a las modificaciones técnicas o a su desarrollo. La necesidad de disponer de fondos para las redes de vigilancia, no es más que una cuestión de acuerdos entre los distintos afectados por el problema, considerando que la industria puede interiorizar los gastos de vigilancia atmosférica con aportaciones económicas que le supondría un coste casi inapreciable para cumplir con esta obligación.

Hay muchos elementos para poder hacer incidir los gastos de mantenimiento de los sistemas de vigilancia en empresas que requieren establecer, como obligación legal, la vigilancia de la calidad del aire como aportación al control de los efectos de su actividad. El principio legal que se aplica esta recogido en el acervo comunitario: “quien contamina paga”, y puede ser aplicado en las obligaciones de los planes de vigilancia de la Autorización Ambiental Integrada, muchas de ellas ahora en trámite permitiendo así su aplicación directa e individual a cada empresa. La aplicación de estos criterios en ambientes en donde la actividad contaminante principal es el tráfico, como en las grandes urbes, sería por medio de la aplicación de tasas por circulación u otros mecanismos que incidan directamente sobre el usuario del vehículo, como ya se está aplicando en algunos países europeos.

En relación con esto, se recomienda la búsqueda de fórmulas en cada CCAA para la integración de las redes privadas dedicadas a la vigilancia de las concentraciones en el entorno inmediato de grandes focos de emisión. Por lo general estas redes automáticas privadas no se han planificado dentro de una estrategia global de control de la calidad del aire. Uno de los resultados esperable de la aplicación de la metodología de optimización a una red automática es la identificación de

huecos (y redundancias) en la cobertura espacial de la red. En ese caso la primera opción, antes que pensar en nuevas inversiones, es trasladar cabinas que puedan estar aportando información redundante o de poco interés. En esta fase sería muy interesante para los gestores contar con estos recursos privados.

Como ya se indica en el punto 4 del art. 11 del Decreto 833/1975, de 6 de febrero, que desarrolla la Ley 38/1972 de protección del medio ambiente atmosférico, *podrán también incorporarse a la Red Nacional aquellos sistemas de medición que, perteneciendo a empresas o instituciones privadas, cumplan las normas técnicas adecuadas.*

Las estaciones pertenecientes a las industrias tienen entre sus objetivos, en la mayoría de los casos, evaluar la calidad del aire según las Directivas vigentes. Teniendo en cuenta este hecho se hace necesario recordar la necesidad de que sus estaciones han de estar sometidas a los mismos estrictos controles de calidad que cualquier otra perteneciente a las redes de vigilancia. Es imprescindible asegurar la fiabilidad de los datos que se emplean en la evaluación de la calidad del aire. Los administradores de red son, en definitiva, los responsables de garantizar la fiabilidad de dichos datos. Los gestores de red disponen de diferentes posibilidades a la hora de integrar las redes privadas en la propia red. En cualquier caso el sistema de integración que se adopte debe permitir al gestor asegurar el control de la calidad de la red en su totalidad.

La herramienta legal que permite estipular a los administradores de red qué modelo se debe seguir en la gestión de la red privada, así como los requisitos que sean necesarios para el control de la calidad de los datos, es preferentemente la Autorización Ambiental Integrada, pudiéndose emplear también otras como los Planes de Vigilancia de autorizaciones específicas, o como los exigidos en las resoluciones de los comités autonómicos de Evaluaciones de Impacto Ambiental.

Son dos los modelos entre los que los gestores de la calidad del aire pueden optar para integrar las redes privadas:

Modelo A: Las estaciones pertenecen a la Administración que la gestiona en su totalidad y es financiada por una tasa específica que se aplicará a cada una de las empresas privadas.

Modelo B: Las estaciones son propiedad de la red privada, su mantenimiento y control de la calidad pertenece a la empresa privada, siendo el gestor de red receptor de datos.

✎ **Ejemplo Modelo A: Contribución económica de las empresas privadas en el mantenimiento de la red de vigilancia de la calidad del aire en la Región de Murcia.**

Desde 1995, viene desarrollándose la firma de convenios específicos por parte de la Consejería de Medio Ambiente, Agricultura y Agua, (hoy Consejería de Industria y Medio Ambiente) y la industria potencialmente contaminadora de la atmósfera de Cartagena, en la financiación del mantenimiento y Planes de Vigilancia de la Red Regional de Vigilancia de la Calidad del Aire.

La base legal de estos convenios es la existencia en el artículo 73 del Decreto 833/75 que desarrolla la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico la obligatoriedad de disponer, a ciertas actividades industriales, de aparatos o sistemas que permitan determinar la concentración de contaminantes en el medio ambiente exterior.

La existencia de una red instalada por la Administración permite que esta medida sea asumida por la Administración Regional al disponer de una completa y moderna red de vigilancia, por lo que parece innecesaria la instalación de más estaciones de vigilancia y por tanto la duplicidad de medios de vigilancia y datos de calidad del aire en zonas que disponen ya de cobertura de vigilancia atmosférica. El disponer por tanto de los medios necesarios para cumplir con los objetivos de vigilancia atmosférica, no exime a las industrias de la obligación legal establecida por lo que estos convenios intentan revertir esa obligación como condición para el sostenimiento económico de los sistemas ya instalados, contribuyendo a los gastos de mantenimiento y Planes de Vigilancia a través de estos convenios, asumiendo el principio de “quien contamina paga” e imputando parte de los gastos de vigilancia atmosférica a las empresas que deterioran la calidad del aire.

Cada empresa contribuye económicamente en función de unos criterios técnicos establecidos y bajo el principio de equidad y solidaridad de las actividades respecto a los efectos que producen sus instalaciones sobre la calidad del aire y a la población en general expuesta, de forma que periódicamente son revisados por la Administración Regional con el acuerdo previo de las empresas firmantes, lo que permite renovar y actualizar algunos de estos criterios técnicos periódicamente en función de los cambios legales u otras circunstancias que así lo aconsejen. La última actualización de los criterios técnicos se realizó en el año 2003 y posteriormente revalidados en el 2005. Las últimas modificaciones del período 2006-2008 responden a altas y bajas de empresas participantes de estos convenios.

Las empresas potencialmente contaminadoras de la atmósfera más importantes de la región se distribuyen en tres zonas diferenciadas, Valle de Escombreras, Cartagena y Resto de la Región. Esta diferenciación zonal, además de otros criterios técnicos relacionados con la capacidad contaminante de las actividades, sirven para establecer un elemento de cálculo de la

aportación económica individual de cada empresa por un período anual. Esta contribución económica aportada entre todas las empresas participantes de estos convenios, se destinará para mantener económicamente las redes y sistemas de vigilancia, así como la gestión de planes de control establecidos o los futuros que pueda establecer la Administración Regional, de forma que se pueda sostener la inversión que realiza la Administración en estos elementos de control ambiental.

La cantidad total aportada por las empresas asciende a 293.000 euros para cada año durante el periodo 2007-2008, que son destinados integralmente al mantenimiento técnico de la Red Regional de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica, Planes de vigilancia y control e intervención industrial.

Por otro lado el compromiso de la Administración Regional de invertir y mejorar los sensores de contaminación integrados en la Red, se ha materializado con la adquisición en los últimos tres años, de instrumentación analítica por valor de 700.000 euros, lo que ha supuesto la renovación de más de 40 analizadores de gases y partículas. Para el periodo entrante, se va a realizar una incorporación de sensores meteorológicos y de un modelo predictivo, que completará el sistema de diagnóstico específico diseñado a nivel local y que se podrá ampliar al nivel regional.

La pronta puesta en marcha del Centro Regional de la Calidad del Aire, como instrumento de gestión de la información generada sobre contaminación atmosférica en la región, culminará la renovación de este sistema de control atmosférico que contará con vigilancia continua sobre el estado de la calidad del aire regional, suministrará información a través de página WEB para que llegue a cualquier ciudadano interesado por estos temas.

Criterios técnicos para la valoración de las aportaciones económicas de las empresas potencialmente contaminadoras de la atmósfera para el mantenimiento de la red de vigilancia:

Los criterios técnicos que se utilizan para calcular la aportación económica de cada empresa se basan en las emisiones que produce cada actividad, la zona en donde esta ubicada y al grupo al que pertenezca según el catálogo del anexo II del D. 833/75 de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera.

Se han distinguido como elementos en este cálculo los aspectos relacionados con el foco emisor de cada actividad y su régimen de funcionamiento. En relación con las emisiones se

han diferenciado por el volumen total efectivo y por el tipo de contaminantes emitidos. Para cada criterio se establecen tres valores, bajo (1) intermedio (1,2) y alto (1,5).

El cálculo se aplica por medio de un polinomio, en el cada factor es la aplicación del valor del criterio aplicado, teniendo en cuenta que la aportación total del conjunto de las empresas es fija, incrementada por el del PIB del período de aplicación y partiendo de una cantidad mínima por empresa.

Criterio de valoración:

C: Catálogo de actividad según anexo II D: 833/75.

Grupo C.....	1
Grupo B.....	1,2
Grupo A.....	1,5

F : Naturaleza del foco emisor.

Localizados.....	1
Difusos.....	1,2
Localizados+difusos.....	1,5

Z: Zonificación: (zona en donde se ubica la instalación).

Resto de la región.....	1
Cartagena.....	1,2
Valle de Escombreras.....	1,5

H: Horas de funcionamiento.

< 1000 h/año.....	1
1000< 3000 h/año.....	1,2
3000 h/año.....	1,5

E: Volumen de emisión en m³/h.

< 500.000	1
500.000< 1.000.000.....	1,2
1.000.000.....	1,5

T: Tipos de contaminantes.

Partículas.....	1
Partículas+SO ₂ +NO _x +COT....	1,2
Partículas+SO ₂ +NO _x +COT + otros..	1,5

84

≠ **Modelo B.** El gestor de red es el receptor de datos de la empresa privada. Hemos de diferenciar entre dos procesos importantes previos a la emisión de datos considerados como válidos: 1) mantenimiento, verificación y calibración de equipos; 2) validación de datos.

Mantenimiento, verificación y calibración de equipos:

La empresa privada se encargará del mantenimiento y control de calidad de las estaciones, cumpliendo los mismos requisitos que las de propiedad del gestor. La misma institución privada puede realizar las labores de mantenimiento, verificación y calibración de los equipos, sistemas de adquisición y transmisión de datos... al igual que subcontratar parcial o totalmente dichas labores.

En cualquier caso es necesaria la implantación de un sistema de aseguramiento de la calidad, no sólo gestión de la calidad, cuyo objetivo inmediato sea la acreditación. Este sistema de control de la calidad debe ir encaminado a cumplir con los requisitos que marcan las directivas en cuanto a incertidumbre de medida de los contaminantes y a cobertura de datos válidos.

Debe existir un protocolo claro mediante el cual el gestor de red pueda auditar a las empresas privadas mediante labor de inspección en cuanto a su control de calidad de la red. El mismo modo serán posibles ejercicios de intercomparación de equipos o estaciones.

Validación de datos:

En relación con la validación de datos el grupo de trabajo *"Grupo Control y garantía de calidad en las redes de vigilancia de calidad del aire"*, incluye en el último apartado de su documento una serie de recomendaciones. Entre ellas *"El ente encargado de la validación de los datos debe ser diferente de aquel que se encargue del mantenimiento de los equipos, verificación y calibración. En definitiva, cualquiera que esté relacionado con la adquisición de los mismos"*.

Preferentemente la validación de datos debe correr a cargo del gestor de la red, o de personal contratado y cualificado para ello. No se recomienda la validación por parte del propietario de la red, o por el personal de mantenimiento que esta contrate (en todo caso de ser así, es responsabilidad del gestor el seguimiento de esta validación). El envío de datos será directo desde el sistema de adquisición de datos de la estación al centro de control del gestor de red.

El gestor comunicará a la empresa mediante un protocolo establecido los resultados de cada validación, comunicando además la posibles anomalías detectadas y ésta será responsable de detectar las causas que las motivaron, siendo igualmente la empresa privada la responsable de

asegurar un buen mantenimiento en su red con el fin de alcanzar los objetivos de cobertura e incertidumbre.

4.2. SISTEMAS DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE.

En la introducción se destacó que todas las recomendaciones, procedimientos, etc. propuestos en este documento son inviables en la práctica sino se dispone, por parte de los gestores de la calidad del aire, de los medios humanos y materiales necesarios. La garantía de esta disponibilidad es por supuesto una dotación económica ajustada a las necesidades de gestión, que fundamentalmente consisten en la adquisición y mantenimiento de los medios técnicos, y en la consolidación de personal experto en todas las facetas que implica la gestión de la calidad del aire (evaluación, información al público y control).

Sobre esta base el sistema de gestión se puede desarrollar siguiendo dos esquemas no necesariamente incompatibles: la creación en las diferentes CCAAs de Centros de Control dedicados a la gestión de la calidad del aire que abarquen todas las tareas asociadas a esta, o bien, la participación de grupos de trabajo externos a la administración (universidades, centros de investigación, ...) de reconocida competencia para la realización de las tareas encomendadas. La elección dependerá entre otras cosas de la facilidad de cada gestor para implementar uno u otro, o una combinación de ambos.

4 Centros de control

Los sistemas de explotación de los datos de calidad del aire a través de un centro que gestione la información son una opción para cumplir con los criterios de la Directiva sobre acceso a la información al público, como gran reto de los gestores de redes, a los que les compete el cumplimiento de las normativas. Igualmente, la necesidad de dotar al sistema, que en sí permite la vigilancia en continuo de los criterios de calidad del aire, de personal u operadores que permanezcan 24 horas, no es baladí; e incluso en ubicarlos en centros de emergencias (112) con el fin de dotarlos de elementos que existen en estos centros y las ventajas que supone.

Uno de los objetivos perseguidos en la gestión de la calidad del aire es el de disponer de un punto nodal del sistema que reciba todos los datos de las distintas redes o estaciones operativas de vigilancia atmosférica de un territorio. Estos centros Regionales/autonómicos garantizan este objetivo, y para ello deben integrar las redes municipales o privadas, de manera que solo exista un representante de la información oficial que se genere en un territorio y cuyas funciones serían:

- La validación de los datos y almacenamiento de históricos así como su garantía
- La homogeneización de formatos de ficheros para su remisión a los organismos oficiales o instituciones que lo soliciten
- La generación de informes sobre la calidad del aire de su CC.AA.
- Mantener sistemas de información al público en continuo, especialmente en momentos de superación de umbrales horarios (servicio 24 horas)
- Controlar la verificación del mantenimiento de la instrumentación.
- Actuar, como centro de operaciones en procedimientos de intervención en áreas en las que existan planes de mejora o planes de intervención sobre industrias.

Como ejemplo de Centro de control sirva la experiencia de la actuación de la Comunidad de Murcia a través del centro Municipal de Cartagena. Durante 10 años se ejecutaron por medio del centro municipal, los Planes Operativos de Intervención de las industrias a través de los datos suministrados por la red de vigilancia. Estas intervenciones suponían la parada o reducción de carga en algunas de las instalaciones que más incidían en la calidad del aire.

4 Participación de organismos externos en la gestión

La ventaja del anterior esquema de gestión es que supone la centralización y la gestión integral de la calidad del aire dentro de un organismo propio de la administración, asegurando de esta manera la continuidad y la consolidación de los medios técnicos y humanos.

Sin embargo, la complejidad del fenómeno de la contaminación atmosférica que abarca diferentes campos relacionados con la física y química de la atmósfera, entre ellos: meteorología aplicada al transporte y dispersión de contaminantes, química atmosférica, modelización numérica, etc., requerirá en muchos casos del apoyo de especialistas en dichos campos.

La "masa crítica" de personal y medios materiales (al día de los conocimientos científicos más recientes) que es necesaria para aportar los criterios, procedimientos y herramientas para la evaluación de la calidad del aire, no siempre es asumible por una sola CCAA. En esos casos es importante el papel que juegan centros de investigación de referencia en sus respectivos campos apoyando a los gestores de la calidad del aire, y esta alternativa se plantea como más ventajosa .

En cualquier caso, como se indica al principio del capítulo cualquiera de las dos alternativas puede conformar un buen sistema de gestión. Y de hecho, probablemente la solución óptima se

encuentre precisamente en la combinación justa de ambos esquemas, aprovechando las ventajas y evitando los inconvenientes de cada una de ellas.

5. BIBLIOGRAFIA:

- [1] EEA (2006) *Air pollution by ozone in Europe in summer 2005* Technical Report N° 3/2006
- [2] EEA (2005) *Air pollution by ozone in Europe in summer 2004* Technical Report N° 3/2005
- [3] EEA (2003) *Air pollution by ozone in Europe in summer 2003* Technical Report N° 3/2003
- [4] Millan M.M., Salvador R., Mantilla E., Artiñano B. (1996) Meteorology and photochemical air pollution in southern Europe: Experimental results from EC research projects. *Atmospheric Environment* 30 12
- [5] Millán, M.M., Salvador, R., Mantilla, E., Kallos, G. (1997) *Photo-oxidant dynamics in the Western Mediterranean in summer; Results of European research projects*, J. Geophhy. Res., 102, D7, 8811-8823, 1997.
- [6] Council of the European Union (Junio 2006) *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on ambient air quality and cleaner air for Europe - General approach*
- [7] Gangoiti G., Alonso L., Navazo M., Albizuri A., Perez-Landa G., Matabuena M., Valdenebro V., Maruri M., García J.A., Millán M. (2002) Regional transport of pollutants over the Bay of Biscay: analysis of an ozone episode under a blocking anticyclone in west-central Europe. *Atmospheric Environment*, 36, 8
- [8] EU Commission (2002) Guidance for implementing Directive 2002/3/EC of the European Parliament and of the Council of 2 February 2002 relating to ozone in ambient air
- [9] DG Environment (2003). *Handbook on the implementation of the environmental legislation. Section 3: Air Quality Legislation*. (<http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/air.pdf>)
- [10] Allwine K.J., Whiteman C.D. (1994) Single-station integral measures of atmospheric stagnation, recirculation and ventilation. *Atmospheric Environment* 28 4
- [11] Derwent R.G., Davies T.J. (1994) Modelling the Impact of NO_x or Hydrocarbon Control on Photochemical Ozone in Europe. *Atmospheric Environment* 28 12
- [12] Seinfeld J.H., Pandis S.N. (1998) *Atmospheric Chemistry and Physics. From air pollution to climate change*. Wiley-Interscience

- [13] Millán M.M., Mantilla E., Salvador R., Carratalá A., Sanz M.J., Alonso L., Gangoiti G., Navazo M. (2000) Ozone cycles in the western mediterranean basin: Interpretation of monitoring data in complex coastal terrain. *Journal of Applied Meteorology* 39
- [14] Diéguez J.J., Palau J.L., Perez-Landa G., Stein A., Millán M.M. (2004) Guidelines on the output from the UAQIFs for the Castellón area, Spain. En: *FUMAPEX Guidelines of output from UAQIFSs as specified by end-users* Leiv Havard Slordal (NILU) ISBN: 82-425-1532-8
- [15] Adame, J.A. 2005. "Caracterización y comportamiento del ozono superficial en la provincia de Huelva". Tesis Doctoral. Universidad de Huelva.
- [16] Plaza P., Pujadas M., Artiñano B. (1997) Formation and transport of the Madrid ozone plume. *Journal of the Air & Waste Management Association*,47
- [17] Diéguez J.J., Monter C., Mantilla E., Millan, M. (2004) Zonificación de la Comunidad Valenciana y dinámica de contaminantes. IX Congreso de Ingeniería Ambiental - Proma 2004.509-519 p
- [18] Millán, M. M.; 1987: The regional transport of tall stack plumes. In: Sandroni, S. (ed.): *Regional and Long-range Transport of Air Pollution*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands, 249 - 280.