

## **ANTECEDENTES**

## 2. Partículas. Generalidades, definición y clasificación

### 2.1 Generalidades de las partículas.

Desde el punto de vista químico, la capa inferior de la atmósfera está formada por dos grandes grupos de compuestos, los que se encuentran en proporciones constantes: nitrógeno, oxígeno y gases nobles y los que se encuentran en proporciones variables: dióxido de carbono, vapor de agua y los diversos contaminantes. Ambos tipos de compuestos constituyen el aire.

Los gases contaminantes primarios más frecuentes son: óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ),  $\text{H}_2\text{S}$ , óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}$ ), hidrocarburos (HC), monóxidos de carbono y anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ). También se tiene como contaminantes primarios las partículas en fase sólida o líquida.

Las partículas suponen entre el 10 y el 15 por ciento de la masa total de contaminantes en la atmósfera, aunque este porcentaje no es muy alto, sí lo es en cambio, el riesgo potencial de las mismas.

La concentración de las partículas se mide en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , es decir, cantidad de masa de materia particulado encontrada tras hacer pasar por el filtro una cantidad de volumen de gas (aire).

Durante la última década, distintos estudios epidemiológicos han puesto de manifiesto los efectos negativos que sobre los animales, sobre la vegetación y materiales tienen las partículas. En cuanto a la salud humana, afectan entrando por las vías respiratorias, pudiendo quedar retenidas en los alvéolos pulmonares, llegando a provocar distintas afecciones neumológicas.

### 2.2 Definición de partículas.

Con el término genérico de partículas se designan en el campo de la contaminación atmosférica las sustancias en estado sólido o líquido, excepto el agua no combinada, dispersas en un gas, de tamaño mayor que el de las moléculas pero menor de 500 micrómetros.

Existen otras definiciones sobre partículas, por ejemplo la Sociedad Meteorológica Americana (SMA 2000) define el término de partícula atmosférica como aquel componente de la atmósfera constituido de materia sólida o líquida. Existen también otros términos que se usan con el mismo

sentido como polvo (material sólido en la atmósfera en forma de pequeñas partículas irregulares, la mayoría de las cuales son de tamaño de grano microscópico) aerosol (partículas sólidas y/o líquidos incluidas en un medio de dispersión ya sea gas o aire).

### 2.3 Clasificación de partículas.

Existen en el aire una gran variedad de partículas de humo, polvo, hollín, fibras, gotas, etc. Con un amplio margen de tamaños que comprende desde las moléculas hasta las partículas de polvo invisibles al microscopio, las dimensiones varían desde  $6 \cdot 10^{-4}$  a 500 micrómetros de diámetro aerodinámico. Se entiende por diámetro aerodinámico al de una partícula esférica de densidad igual a uno, que tiene en el aire la misma velocidad de sedimentación que la partícula considerada (AET.1995).

Los contaminantes particulados pueden clasificarse en función de su tamaño, además de por su composición química (metales, carbón, alquitrán, resina, polen, silicatos, carbonatos, etc.) y de su origen (procedentes de reacciones químicas, procesos radiactivos y físicos).

La clasificación en función de su tamaño puede ser: *iones* (son las partículas cargadas y que poseen un tamaño inferior a  $0,1 \mu\text{m}$ ), *materia suspendida* (la cual a su vez se puede dividir en los llamados núcleos de Aitken que poseen un tamaño comprendido entre  $5 \cdot 10^{-3}$  y  $10^{-1} \mu\text{m}$  y materia particulada suspendida, cuyo diámetro comprenden entre  $10^{-1}$  a  $10 \mu\text{m}$ ) y por último la *materia sedimentable* (que posee un tamaño de diámetro aerodinámico entre 10 y  $500 \mu\text{m}$ ).

Dentro de las partículas están los aerosoles, se les conoce como material particulado, siempre que su tamaño esté comprendido entre 0,1 y 10 micrómetros de radio, lo que les otorga una velocidad de sedimentación muy baja permaneciendo suspendidas la mayor parte del tiempo, lo que provoca que sean arrastradas por las corrientes de aire, desde el lugar de donde surgieron (lugar de emisión), complicando la labor de conocer el lugar de origen de estas partículas.

Es por ello que la definición más aceptada de aerosol es: suspensiones en un medio gaseoso, de partículas sólidas o líquidas, de un tamaño tal que poseen una velocidad de caída inferior a  $0,24 \text{ m/s}$  y con un tamaño de partícula inferior a 100 micrómetros.

Los tipos de aerosoles que conocemos son:

- Líquido - gas: neblina y niebla
- Sólido – gas: polvo, humo (humo metálico y humo de una combustión incompleta), smog (mezcla de humo y niebla), haze (mezcla de neblina y polvo), fibras (son las partículas cuyo diámetro es al menos cinco veces inferior con respecto a su longitud).

Las partículas presentan una gran variedad de tamaños y constitución química, lo cual depende principalmente de la procedencia. A su vez, en función de la composición química serán activas a otros compuestos como pueden ser los fluoruros, cloruros, mercurios, plomos, arsénicos, etc., o inertes. También pueden actuar reaccionando de forma que absorban sustancias activas o bien combinarse con otras sustancias obteniéndose sustancias activas.

### 3. Factores a tener en cuenta en el estudio de los contaminantes particulados

El estudio del material particulado tiene como finalidad conocer el origen, tanto natural como antrópico, de las partículas existentes en la atmósfera, además de la identificación de la procedencia de los contaminantes.

#### 3.1 Distribución del tamaño

El principal parámetro caracterizador del material particulado es la granulometría. Las partículas suspendidas en la atmósfera se encuentran en un rango de diámetros comprendidos desde los pocos nanómetros a los varios cientos de micrómetros, dichos tamaños son fácilmente asemejables a los que comprendería un virus ultramicroscópico hasta una partícula de polvo visible por el ojo humano. La clasificación por tamaños para las partículas de estas magnitudes son las que comprenden diámetros aerodinámicos inferiores a 10  $\mu\text{m}$ , las de tamaños menores a 0.3  $\mu\text{m}$  y el último grupo con diámetros inferiores a 0,1  $\mu\text{m}$ . Normalmente se usa 2 micrómetros como el límite para diferenciar entre partículas finas y gruesas.

En las finas podemos incluir los núcleos de Aitken que poseen diámetros menores de 0,1  $\mu\text{m}$ . Estos son núcleos de condensación activa responsables de las gotitas pequeñas que dan lugar a las nubes, emitidos como tales o formados por condensación de vapor. Por otro lado están las partículas de acumulación, las cuales poseen unos tamaños comprendidos entre 0,1 y 2  $\mu\text{m}$  y se obtienen principalmente de la coagulación y acumulación de partículas menores.

En cuanto a las gruesas, se forman principalmente por procesos mecánicos, por evaporación de gotas de líquidos (spray marino), por procesos de combustión, volcanes, plantas y otras fuentes. Las que poseen mayor tamaño son las partículas sedimentables, las cuales están constituidas por partículas sólidas con un tamaño comprendido entre 10 y 500 micrómetros. Esto equivale al polvo grueso, que tiene una velocidad de sedimentación apreciable, además de un tiempo de permanencia en la atmósfera relativamente corto, aunque son partículas que pueden recorrer varias decenas de kilómetros (como es el caso de la intrusión sahariana). Los componentes químicos más usuales en el polvo sedimentable son las sustancias inorgánicas, como dióxido de silicio, sulfatos, cloruros, nitratos. En cuanto a la parte orgánica, los que se observan proceden fundamentalmente de la combustión incompleta del carbón y de los derivados del petróleo (alquitrán e hidrocarburos policíclicos aromáticos). Son las emitidas a la atmósfera como partículas primarias ya que son emitidas directamente como sólidas. Los contaminantes se pueden distribuir por el tamaño en el se suelen encontrar en la atmosfera, Tabla.3-1. Tamaño normal de partículas para varias sustancias y Tabla.3-2 Tamaño predominante de las partículas para varias sustancias, por ello el sulfato normalmente se observa en partícula fina, en cambio el fosfato normalmente se encuentra en la atmosfera como una partícula gruesa.

Tabla.3-1. Tamaño normal de partículas para varias sustancias

Normalmente fina	Normalmente Gruesa	Normalmente bimodal	Variable
Sulfatos, Orgánicos,	Hierro, Calcio, Titanio,		Níquel, Estaño,
Arsénico, Selenio,	Magnesio, Potasio,	Cloratos,	Vanadio, Manganeso,
Ión hidrógeno,	Fosfato, Silicio,	Nitrato	Antimonio, Zinc,
Sales de amonio, Hollín.	Aluminio.		Cobre

Tabla.3-2 Tamaño predominante de las partículas para varias sustancias

Predominantemente fina	Predominantemente gruesa
Azufre, Plomo	Calcio, Silicio, Hierro, Potasio, Titanio.

La distribución de tamaños de partículas hace referencia a la variación de la concentración con el tamaño. Se puede dividir en regiones en función del tamaño, obteniéndose unos rangos también llamados modas que se pueden describir con una función tipo log-normal, obteniéndose un gráfico de tipo campana.

En el gráfico que se muestra a continuación se pueden ver que es trimodal (Whitby K.T.1977), en el cual hay una moda de *acumulación* (tiene altas áreas de superficie), otra de *nucleación* (altos números de concentración) y una moda *gruesa* (alto volumen o masas).

- La *moda de nucleación* (diámetro medio inferior a  $0,1 \mu\text{m}$ ) contiene pequeñas partículas emitidas o nucleadas a partir de gases y que después aumentan de tamaño de coagulación y crecimiento, denominándose también partículas secundarias. Cabría destacar el ácido sulfúrico, el agua, y algunos gases orgánicos pesados que se condensan en las partículas.

- La *moda de crecimiento o de coagulación* desplazan el tamaño de las partículas a la moda de acumulación, entre  $0,1$  y  $2 \mu\text{m}$  de tamaño. Las partículas finas no crecen más de una micra por condensación, las partículas gruesas se generan primariamente por emisión. Algunas de estas partículas caen por lluvia, pero en general son muy ligeras para depositarse por sedimentación. Esta moda puede dividirse a su vez en dos modas, de  $0,2$  y de  $0,5$  a  $0,7 \mu\text{m}$ . El estudio de la moda de acumulación es de gran interés porque influye sobre la salud humana, bien penetrando en el aparato respiratorio pudiendo llegar hasta los alvéolos pulmonares, o bien afectando a la visibilidad al estar cerca del límite de la luz visible. Estas partículas son las que hemos denominado anteriormente como finas.

- La *moda gruesa*, son las de tamaño superior a la moda de acumulación. Son las partículas como el polvo, las de emisiones, aerosol marino, volcanes, partículas botánicas.

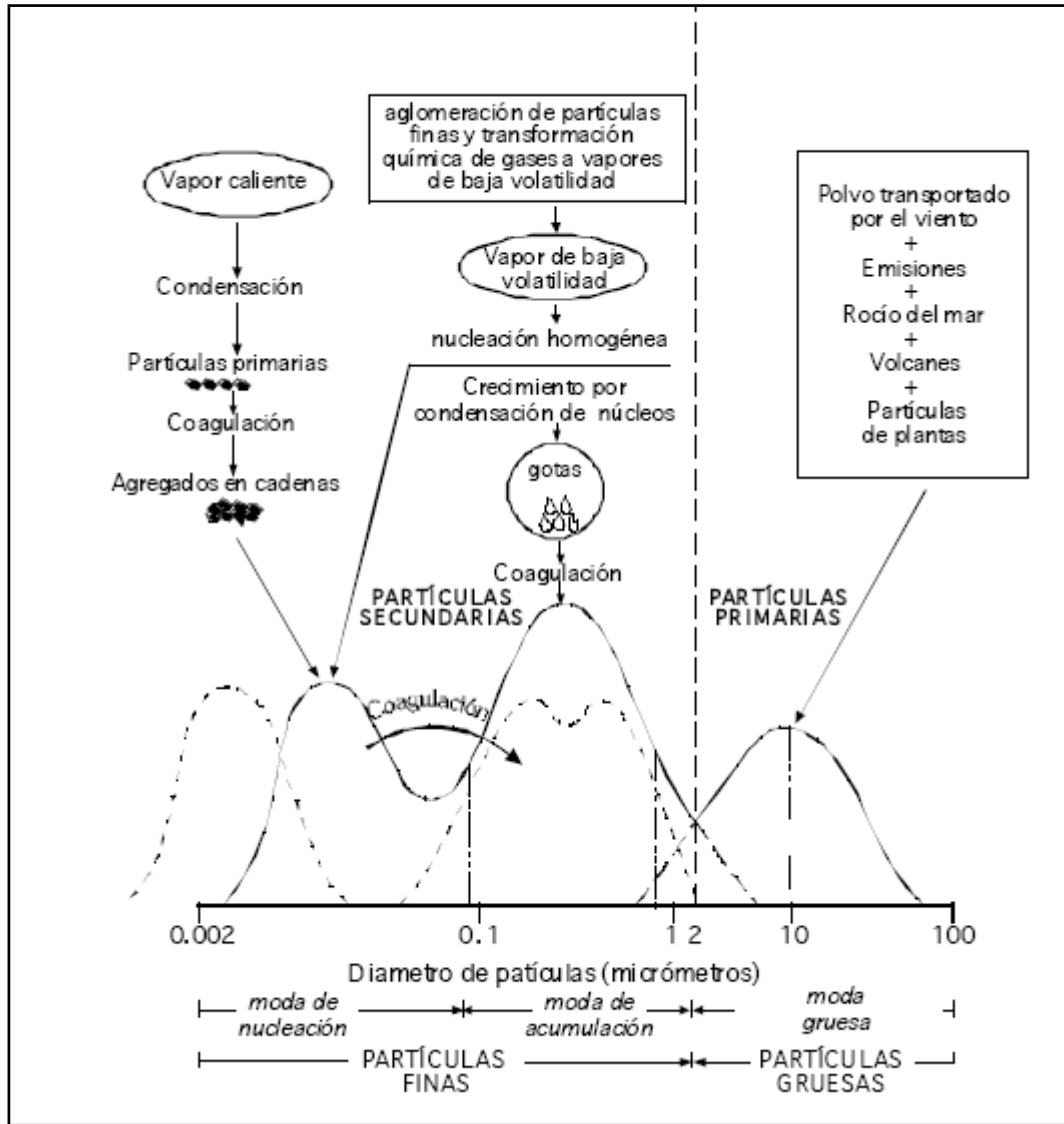


Figura.3-1 Distribución trimodal del tamaño de las partículas

En la figura anterior se puede observar la distribución trimodal del tamaño de las partículas (Whitby et al. 1972a y Husar et al. 1972b), correspondiente a la línea sólida. También está la distribución cuatrimodal de Whitby y Sverdrup (1890), que queda representada como la línea punteada.

En base a la granulometría se hace una clasificación que es la de PTS (partículas totales en suspensión) PM 10 y PM 2,5 (partículas de diámetro aerodinámico inferior a 10 o a 2,5 μm respectivamente)

### 3.2 Características químicas de las partículas atmosféricas. Relación con la composición.

Las partículas atmosféricas pueden tener un origen natural o antropogénico. Las de origen antropogénico son las formadas por condensación de gases emitidos por reacciones químicas (incluida la combustión) y por pulverización mecánica. Las fuentes naturales incluyen la actividad volcánica, el aerosol oceánico, el polvo del suelo, las partículas procedentes de fuegos forestales, la materia orgánica particulada procedente de la vegetación, etc. La *resuspensión* de polvo originado por fuentes naturales y antropogénicas, ocurre cuando las partículas previamente depositadas son movilizadas por el viento u otros procesos.

Se estima que la materia particulada de origen artificial representa desde un 5 a un 50 % del total. En algunas zonas urbanas e industriales el aerosol procede fundamentalmente de fuentes antropogénicas.

En el caso de las partículas procedentes de la combustión, las características químicas estarán determinadas por parámetros tales como composición del combustible, temperatura de combustión, razón aire-fuel, etc.

Pero además dependerá de cualquier reacción que ocurra durante el tiempo de residencia de la partícula en la atmósfera. Los aerosoles ambientales son mezclas de emisiones de numerosas fuentes y son recogidos (o inhalados) después de períodos variables de permanencia en el medio, donde tienen lugar mezclas, reacciones químicas, exposición a diferentes porcentajes de humedad, etc. Por ello, las características químicas de las partículas pueden ser muy variables y complejas.

Aunque únicamente por la composición química no es posible identificar en detalle la fuente específica de las partículas atmosféricas, hay características químicas diferenciales en las distintas fuentes:

a) *Fuentes móviles*: Son responsables de gran parte de las emisiones de plomo. También son responsables de más de un 30% de las emisiones antropogénicas de hidrocarburos.



En la actualidad se está produciendo una disminución considerable de las emisiones de este metal por esta fuente, debido principalmente al uso creciente de gasolina sin plomo.

*b) Fuentes estacionarias de combustión:* Emiten partículas que contienen un gran número de sustancias de interés, pudiendo incluir materia orgánica policíclica, carbón y ciertos metales. Gran cantidad de las emisiones de SO<sub>2</sub> se emiten desde este tipo de fuentes. En la siguiente tabla se pueden observar la clasificación de las fuentes principales.

Tabla.3-3 Clasificación de metales según los tipos de fuentes principales

Emisión de contaminante/s	Origen
Berilio	Carbón
Níquel y vanadio	Fuel
Benzopireno	Combustión del carbón y fuel pesado
Plomo	Automóviles

*c) Otras fuentes estacionarias:* Generan emisiones que tienen componentes característicos de cada proceso. En la siguiente tabla se pueden observar la clasificación de las fuentes principales.

Tabla.3-4 Clasificación de contaminante según el origen

Emisión de contaminante/s	Origen
Vapor sulfúrico	Planta de ácido sulfúrico
Partículas formadas de óxidos de calcio carbonato cálcico	Plantas de cemento
Partículas con metales	Fundiciones y otros procesos metalúrgicos
Partículas con grandes cantidades de sal marina	Zonas costeras

Tal y como se definió para los contaminantes en general, las partículas se pueden clasificar de forma similar:

*Partículas primarias:* Son aquellas emitidas como tales a la atmósfera, pueden ser de tamaño tanto gruesas como finas.

*Partículas secundarias:* Son las formadas en la atmósfera por reacciones físicas o químicas. Muchas de las partículas atmosféricas son aerosoles secundarios: partículas

formadas por complejos como óxido de azufre o vapores orgánicos que son emitidos a la atmósfera como gases, pero por enfriamiento o por reacciones químicas se condensan a partículas. El tamaño en su mayoría es de rango fino.

Desde el punto de vista químico, una de las características de mayor interés es la *acidez de las partículas atmosféricas*, la cual deriva principalmente de la presencia de ácido sulfúrico que se forma principalmente como partícula secundaria por oxidación de los óxidos de azufre. El ácido nítrico que también suele estar presente, generalmente se encuentra en forma de vapor. Parte del ácido sulfúrico es neutralizado por el amonio atmosférico y otros cationes. Algunas veces, sin embargo, puede quedar parte sin neutralizar, aun en presencia de amonio suficiente para su teórica neutralización. Esto entiende como la materia orgánica presente, que protege a la partícula de ser neutralizada.

### 3.3 Transformaciones de las partículas.

#### 3.3.1 Características en cuanto a la reactividad química

- Las partículas están formadas por porciones líquidas o sólidas de materia. En ambas formas condensadas de materia, la movilidad está muy limitada en relación con la forma gaseosa y toda reacción química se producirá en la interfase.
- Las partículas sólidas, generalmente, serán siempre menos reactivas que las líquidas con otras especies gaseosas presentes en la atmósfera; los gases se difunden mejor disolviéndose a través de las gotas líquidas.
- Los sólidos presentan multitud de defectos o imperfecciones en la red, y suelen poseer mayor actividad química cuando se encuentran finamente divididos al presentar mayor superficie específica. La superficie límite del sólido (interfase) es en todos los casos una imperfección en sí misma.
- Con idénticas composiciones químicas, partículas de diferente origen, pueden poseer propiedades diferentes. Así, por ejemplo, las cenizas de carbón que permanecen en la parrilla del hogar y que han sufrido un enfriamiento lento, pueden presentar diferente reactividad que aquellas que, arrastradas por el gas de combustión, son divididas en finas partículas y enfriadas mucho más rápido. Estas últimas, al tener carácter vítreo, pueden presentar mayor reactividad.

- Los aerosoles adquieren reactividad al quedar suspendidos en el aire, como consecuencia de que son capaces de adquirir carga electrostática. Dicha carga estabiliza, por repulsión, a las partículas que permanecen separadas frente al movimiento browniano. Los choques entre partículas favorecerían que se manifestaran las fuerzas de “Van der Waals” y se produjese la condensación. Esta carga electrostática puede propiciar algún tipo de reactividad química especial que se ha sugerido como potenciadora del daño sobre vías respiratorias.
- Además de la reactividad química que se manifiesta en las reacciones en que las partículas se transforman, las partículas intervienen como catalizadores de otras sustancias gaseosas, en procesos de catálisis heterogénea.

### **3.3.2 Procesos físicos que afectan a la composición y distribución de tamaño de las partículas atmosféricas.**

Los procesos físicos que afectan a la composición y distribución del tamaño de las partículas atmosféricas son la condensación y la aglomeración.

La condensación del aire saturado en humedad se produce instantáneamente cuando en la atmósfera húmeda existen núcleos de condensación de tamaño superior al crítico. La formación de una fase en el seno de otra (en este caso fase líquida en el seno del aire) implica la intervención de diferentes energías: energía de condensación, energía de interfase y energía de expansión del medio.

La aglomeración de partículas ha sido estudiada tanto en la naturaleza como en el laboratorio. En condiciones normales, la distribución de partículas en la atmósfera en función del tamaño, es trimodal. Las partículas más pequeñas están formadas por nucleación fotoquímica o condensación de vapor; estas partículas son menores a 0,1  $\mu\text{m}$ . El siguiente rango va de 0,1 a 2  $\mu\text{m}$ . Las partículas de este tamaño, no son fácilmente eliminadas de la atmósfera ni por difusión ni por procesos de impacto, en la distribución logarítmica normal. En este rango de tamaño se le denomina modo de acumulación. A las partículas de tamaño mayor, se les denomina gruesas. Gran cantidad de evidencias demuestran que las partículas finas y gruesas son químicamente diferentes. Los procesos de condensación producen las finas mientras que los procesos mecánicos o de combustión o abrasión producen las gruesas.

Se ha observado que la aglomeración de partículas menores a  $0,1 \mu\text{m}$ . (núcleos) sobre el resto, reduce su número en un 79% por hora, mientras que la aglomeración de núcleos con ellos mismos reduce su número en un 31% por hora.

### 3.4 Transporte.

El problema de la contaminación atmosférica queda reducido tal y como se ha dicho a las capas bajas de la atmósfera, en general de 0 a 500 metros sobre el nivel del suelo.

Al producirse el transporte de partículas, lo que se consigue principalmente es distribuir los contaminantes en un volumen de aire proporcional a la velocidad del mismo.

La velocidad del viento, que es uno de los principales factores que realizan la función del transporte, no es uniforme, variando de forma exponencial en función de la altura. La velocidad de los vientos está muy relacionada con las temperaturas y las presiones de las masas de aire. Los vientos en la zona de la atmósfera libre siguen una dirección horizontal según las líneas isóbaras, viéndose influenciados por los gradientes de presión.

En ausencia de vientos, los movimientos de una masa de aire en la atmósfera son debidos a los gradientes de presión, a las fuerzas centrífugas por unidad de volumen y a las de Coriolis, que provocan la dispersión de contaminantes por difusión forzada o libre.

El efecto neto del transporte de partículas provoca que, al aumentar la distancia de la fuente, decrezca la concentración de aerosol, incrementándose considerablemente la proporción de partículas que se sitúan en el denominado rango de acumulación «finas», con diámetro medio de 0,4 a 1  $\mu\text{m}$ ., ya que los núcleos han sido eliminados por coagulación y las «gruesas» por sedimentación.

El transporte a microescala y la dispersión de partículas finas, hasta unos pocos kilómetros de la fuente, es un proceso bastante bien descrito, al igual que los modelos que representan el comportamiento de los contaminantes que están generalmente basados en las formulas de dispersión desarrolladas para contaminantes gaseosos. Cuando los mecanismos de deposición seca son importantes, se introduce en la fórmula un término de reducción, a veces exponencial. Otras veces se han desarrollado fórmulas muy complejas para el transporte de partículas basadas en la observación más detallada de los fenómenos de deposición húmeda y seca.

El transporte de partículas a escala regional y a macroescala, desde diez a varios miles de kilómetros de la fuente, ha sido observado en numerosas áreas, como por ejemplo en el este y oeste de Europa, además de las intrusiones saharianas que se dan en las Islas Canarias al igual que en la parte sur de España (Andalucía). Además se ha comprobado que puede ocurrir transporte de partículas a varios miles de kilómetros; así, se han encontrado partículas sobre Alaska que dicen proceder de Asia Central.

Existen muchos modelos para calcular el transporte a macroescala, lo cual es bastante complejo debido, entre otros factores, a fenómenos de turbulencia de la atmósfera, como ciclones y anticiclones difíciles de prever.

### 3.5 Eliminación de las partículas de la atmósfera.

Las partículas pueden ser eliminadas de la atmósfera por cualquiera de los siguientes procesos:

- Al proceso en el que las partículas de aerosol que contactan con la tierra u otras superficies y se depositan, se conoce como “deposición seca”.
- Al proceso de eliminación de las partículas de aerosol arrastradas por la precipitación de lluvia o nieve, se le denomina “deposición húmeda”.

Factores que influyen en el factor de eliminación:

#### 1.- *Tamaño de la partícula:*

Partículas menores de  $0,1 \mu\text{m}$ : no se ven afectadas ni por la “fuerza de la gravedad”, ni por “fuerzas electrostáticas” y son controladas exclusivamente por el “movimiento browniano”. Son los procesos de difusión los que controlan la tasa de deposición de estas pequeñas partículas.

Partículas mayores: Su deposición está controlada por procesos aerodinámicos como el impacto con sedimentación o la sedimentación a la tierra.

#### 2.- *Lluvia*

La lluvia puede eliminar los aerosoles de la atmósfera por dos procesos básicos.

- En el primero el aerosol sirve como núcleo de condensación al vapor de agua, siendo capturado en la formación de partículas de nube denominada “rainout”.

Las partículas mayores a una micra son eficientes núcleos de condensación para la formación de partículas de nube. Varios fenómenos físicos contribuyen de forma conjunta al “rainout”. Las partículas de menos de un micrómetro, pueden aumentar su tamaño por medio de la condensación de agua en nubes convectivas, donde la velocidad vertical es relativamente grande.

- En el segundo, el aerosol es arrastrado por las gotas de lluvia y cuando caen, se les denomina “washout”. Este proceso es muy efectivo para partículas mayores de  $1\mu\text{m}$ . Las partículas menores de  $1\mu\text{m}$ ., la captura inercial es inefectiva, y prácticamente no son afectadas por la lluvia y la eliminación aumenta por la difusión browniana.

### 3.- Deposición seca

La deposición seca de partículas atmosféricas puede ocurrir por sedimentación gravitacional, por impacto inercial o por difusión browniana.

Para partículas mayores de  $2\mu\text{m}$ : Es la sedimentación el principal proceso que las elimina. La velocidad final de estas partículas puede ser estimada usando la ley de Stokes para fluidos viscosos y su incremento con el cuadrado del diámetro de la partícula.

Para partículas submicrométricas el efecto de la sedimentación es despreciable y el transporte a la superficie se produce por difusión turbulenta. El mecanismo es en gran parte el mismo para el transporte de gases y de grandes partículas. Con un viento muy flojo y condiciones estables la carencia de turbulencias puede limitar la deposición de partículas finas.

El tiempo medio de residencia del aerosol atmosférico dependerá de su tamaño, concentración y altura sobre la tierra. Se puede estimar el tiempo de vida de un aerosol en función de su altura sobre la tierra, como se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla.3-5. Relación entre la distancia de las partículas y el tiempo de permanencia.

Distancia	Tiempo de permanencia
Cerca de la superficie:	4 días
Troposfera baja:	14 días
Troposfera alta:	30 días
Estratosfera inferior:	1 - 2 años

## 4. Efectos de las partículas.

### 4.1 Efectos sobre la salud humana

Las partículas respiradas por el hombre provocan efectos diversos que dependen fundamentalmente de sus características físicas y químicas y de su poder toxicológico. Las partículas aspiradas que contengan compuestos solubles, o bien que se encuentren en estado líquido, pueden ser absorbidas por el tejido donde se depositan pudiendo causar daños si son corrosivas o tóxicas. En el resto de los casos el efecto dependerá de la región donde se deposite y del mecanismo de eliminación. El tamaño de la partícula determina su penetración en el aparato respiratorio humano.

Se considera materia particulada inhalable, la que tiene un diámetro equivalente igual o menor a 15  $\mu\text{m}$ . Este tamaño fue considerado teniendo en cuenta que hay situaciones en que la deposición puede aumentar, por ejemplo, realizando ejercicio y respirando por la boca, esta fracción de partículas puede depositarse en los conductos del aire y en las zonas de intercambio gaseoso del sistema respiratorio humano. Además, existe un segundo tamaño de partículas, las de diámetro equivalente menor o igual a 3  $\mu\text{m}$  que son especialmente peligrosas por poder penetrar en la región del tracto respiratorio responsable del intercambio gaseoso.

El sistema respiratorio humano puede mover gran cantidad de partículas y la calidad del aire estándar está basada en la cantidad total de materia particulada con adecuada protección.

La medida de materia total particulada no refleja el daño potencial sobre la salud que pueden ejercer determinadas partículas específicas o rangos de tamaño. El efecto que puede tener para la salud determinadas clases de partículas es desproporcionadamente grande en relación a la fracción que representa respecto al total de la masa de materia particulada en suspensión. Así, las menores a 3  $\mu\text{m}$ . de diámetro aerodinámico pueden penetrar en los pulmones y su presencia física puede causar enfermedades y reducir la función pulmonar. Por otra parte, las que poseen compuestos solubles químicos o corrosivos pueden causar daños sobre los tejidos donde se depositan al ser disueltos y absorbidos por los mismos.

Las propiedades aerodinámicas del aerosol y la fisiología de la respiración determinan la deposición del aerosol. Los tres mecanismos principales de deposición de partículas

(impactación inercial, sedimentación y difusión) varían en las distintas regiones del aparato respiratorio.

- *Deposición por impactación inercial*: Es proporcional al flujo volumétrico y a la sección aerodinámica de la partícula. Ocurre en situaciones de alta tasa de flujo y de cambios abruptos de dirección como en nariz y garganta y menos frecuentemente en la tráquea y bronquios. La impactación inercial afecta a partículas mayores o iguales a 5  $\mu\text{m}$  de diámetro aerodinámico.

- *Deposición por sedimentación*: Es proporcional al peso de la partícula y se ve favorecida por el tiempo de residencia; ocurre principalmente en la tráquea y bronquios. Las partículas inhaladas con diámetro equivalente de 1 a 5  $\mu\text{m}$ , son retenidas más eficientemente por sedimentación.

- *Deposición por difusión*: Resulta del movimiento al azar, por ejemplo browniano, de partículas. La deposición por difusión es más común en la región alveolar y es responsable de la deposición de partículas menores de 0,5  $\mu\text{m}$  de diámetro.

Las partículas muy pequeñas no se acumulan sobre la superficie de los pulmones, sino que son absorbidas por los fluidos y eliminadas del cuerpo.

En general, el aparato respiratorio, es un filtro eficaz para partículas mayores a tres micrómetros. Las que se depositan en la nariz o en la tráquea, pueden ser expulsadas por el sistema mucociliar; esto no es posible en las partículas depositadas en los pulmones o en los alveolos, pudiendo permanecer en este último sitio hasta un año.

Muchas partículas poseen componentes solubles que pueden ser absorbidos por los tejidos donde se depositan causando daños si son corrosivos o tóxicos. Entre los componentes tóxicos más frecuentes se encuentran:

- **Metales tóxicos**: Existen varios metales que se sabe que están asociados con las partículas atmosféricas y sus efectos tóxicos son conocidos.

El *plomo* es el metal contaminante del aire con un potencial de riesgo mayor; las partículas atmosféricas que lo contienen proceden en su mayoría de la combustión de gasolinas con plomo. Ha sido asociado a un incremento en plomo en la sangre de niños y adultos. La exposición primaria se produce por la inhalación de partículas que lo contienen, mientras que la secundaria se produce por la ingestión de alimentos



contaminados por partículas atmosféricas que lo contienen. En las personas el plomo afecta a los eritrocitos y al sistema nervioso, a los tejidos blandos (hígado, riñones) y a los huesos.

El *mercurio* es un metal muy tóxico, se acumula en el nervio óptico y puede producir tanto insomnio como pérdida de memoria y trastornos severos de la personalidad. Los fetos y los niños son más sensibles al envenenamiento por mercurio. La liberación de mercurio a la atmósfera procede tanto de fuentes naturales como antropogénicas. La toxicidad de la exposición depende de la cercanía a la fuente.

El *cadmio* y *arsénico*, cuando es inhalado en altas concentraciones, puede producir daños severos en el pulmón y el riñón, siendo su efecto es además acumulativo.

De todos los metales tóxicos, solo el plomo ha estado presente en la atmósfera urbana, aunque ha disminuido considerablemente a raíz del uso progresivo de gasolina sin plomo. El resto de los metales solo aparecen en concentraciones elevadas cerca de la fuente.

#### **- Dióxido de azufre y ácido sulfúrico/ sulfatos:**

Las evidencias epidemiológicas relativas a la toxicidad de estos compuestos son complicadas debido a que generalmente aparece la materia particulada junto con otros contaminantes. Sin embargo, está claro que una alta concentración de materia particulada total con altas cantidades de óxido de azufre, puede producir desde mareos hasta la muerte. Asociados a los episodios de contaminación atmosférica, se ha observado un aumento de la morbilidad y de la mortalidad.

Muchas evidencias sugieren que los aerosoles de sulfato contribuyen a los efectos sobre la salud de la contaminación atmosférica, originan una disminución de la capacidad de difusión del monóxido de carbono y causan alteraciones en la mucosa bronquial. Como es un ácido fuerte cabría pensar que tuviese un gran poder irritante sobre el aparato respiratorio, sin embargo, esto no es así debido a la presencia de amonio en el tracto respiratorio que hace que todo el ácido sulfúrico inhalado o gran parte de él, pueda ser neutralizado antes de entrar en contacto con la mucosa.

#### **- El vapor de ácido nítrico y las partículas de nitratos**

Las partículas procedentes del óxido nítrico tienen un efecto análogo a las partículas de sulfato del dióxido de azufre. Además tanto el vapor de ácido nítrico como las partículas de nitrato

pueden ser un componente importante de la lluvia ácida teniendo efectos significativos sobre la salud.

**- Otras partículas:**

En el aerosol atmosférico existe un gran número de partículas de otro tipo que contribuyen al impacto sobre la salud, por ejemplo, los cigarrillos también producen partículas de tamaño pequeño procedente de la pirolisis que se depositan en los pulmones de los fumadores y se sabe que son cancerígenas.

La exposición a las partículas atmosféricas ocurre generalmente acompañada por la exposición a otros contaminantes. Hay que tener siempre presente que un contaminante puede modificar el efecto de otro.

Las partículas pueden además interaccionar con otros contaminantes atmosféricos, por absorción de contaminantes gaseosos o reacciones químicas en su superficie. Estos procesos pueden modificar las partículas y convertirlas en otras más o menos peligrosas que las originales.

Por ejemplo, es frecuente que la contaminación atmosférica por partículas coincida con la contaminación por óxidos de azufre, por lo que sería deseable evaluar el efecto sobre la salud de estos contaminantes conjuntamente, como se muestra a continuación.

Una contaminación alta de partículas y SO<sub>2</sub> provoca enfermedades respiratorias severas como bronquitis y enfisemas. Los efectos son más evidentes en los ancianos y en los niños, así como en las personas enfermas.

Se sabe que el vivir en grandes ciudades está asociado con una mayor incidencia de cáncer, y algunos de los compuestos mutagénicos pueden ser encontrados en las partículas, lo cual sugiere que éstas, puedan ser en algún grado carcinogénicas.

Por tanto, la partícula inhalada puede ejercer un efecto adverso sobre la salud, bien por daño local al tejido por una partícula insoluble que se deposita en los pulmones, o bien, a través de la disolución y absorción de los componentes tóxicos de la misma.

## 4.2 Efectos sobre la vegetación

Las partículas atmosféricas pueden causar daños a la vegetación. El tipo de daño que ocasionan depende del tamaño de la partícula, de la composición y de la cantidad de concentración en el aire ambiente.

*Cantidad:* Un depósito excesivo de partículas de polvo, como el producido, por ejemplo, por las cementeras, puede originar una capa o película sobre las hojas, tallos y flores de las plantas, y si existe humedad, la existencia de esta capa que no se dé la fotosíntesis. Los estomas de las hojas pueden llegar a obstruirse si están en la parte superior.

*Composición química:* El polvo puede además causar daños directos sobre las hojas y las flores. Las partículas que contienen fluoruros, óxido de magnesio y hollín pueden llegar a causar daños directos.

De entre los distintos componentes de las partículas, son los que contienen dióxidos de azufre los más peligrosos debido a la gran toxicidad que tienen para la vegetación. El daño se produce por exposición a altas concentraciones durante períodos cortos o bien por exposición a concentraciones relativamente bajas durante largos períodos. Las nieblas de ácido sulfúrico producen en las hojas manchas debido al depósito de ácido sobre las mismas cuando están humedecidas.

Las partículas que contienen flúor o sus derivados también son tóxicas para las plantas a muy bajas concentraciones, además presentan un efecto acumulativo.

La materia particulada fina es el principal convector de ácido en la atmósfera. La lluvia ácida contiene ácido sulfúrico, nítrico e hidroclorehídrico y puede inhibir severamente el crecimiento y afectar la salud de los vegetales, tanto por contacto directo como por acidificación del suelo.

## 4.3 Daños sobre los materiales

En este terreno cada vez se está prestando más atención a los efectos de la contaminación atmosférica, tanto por las repercusiones económicas que tiene, como por los daños irreparables que causa sobre monumentos histórico-artísticos.

La acción de los contaminantes atmosféricos sobre los materiales puede manifestarse tanto por la sedimentación de partículas sobre la superficie de los mismos, deteriorando su aspecto externo, como por el ataque químico al reaccionar el contaminante con el material.

Las nieblas de ácido sulfúrico procedentes de la conversión catalítica del  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  en la atmósfera atacan los materiales de construcción como el mármol, la caliza y la argamasa, convirtiendo los carbonatos en sulfatos solubles en el agua de lluvia. Esto, unido a que el volumen de los sulfatos es mayor que el de los carbonatos, hace que en la piedra aparezcan escamas y se debilite mecánicamente.

Los óxidos de azufre ( $\text{SO}$ ) producen aceleración en la corrosión de metales como acero, acero galvanizado, zinc, compuestos de cobre, níquel y aluminio. Esta aceleración se ve considerablemente favorecida por la presencia de partículas depositadas.

Los daños sobre los materiales no se reducen sólo al ataque de los componentes químicamente activos como los ácidos sulfúrico y nítrico, sino que también incluyen la acción disolvente de los contaminantes gaseosos, incluidos los óxidos de azufre, óxido de nitrógeno, sulfuro de hidrógeno, amonio y ozono. Los efectos, por tanto, pueden ser variados: corrosión de metales, deterioro y decoloración de pinturas, erosión de piedra y albañilería, debilitamiento y rotura de tejidos.

#### **4.4 Efectos sobre los ecosistemas**

Los efectos sobre los ecosistemas se deben principalmente a las lluvias ácidas, siendo las partículas los principales convectores de ácido en la atmósfera.

Los primeros efectos producidos por las lluvias ácidas, se detectaron en unos lagos escandinavos en los años sesenta. Hoy se sabe que este problema afecta a gran cantidad de lagos de Europa, Canadá y E.E.U.U., originando graves problemas en la biología acuática al afectar a todos los niveles de la cadena trófica.

#### **4.5 Efectos sobre la visibilidad**

La absorción y dispersión de la luz por las partículas de aerosol causa un descenso de la visibilidad y una disminución de la intensidad de luz que llega a la tierra. Se ha estimado que

tanto refracción como absorción son responsables de la pérdida de la radiación en un 20% en zonas rurales.

La presencia de partículas en la atmósfera produce la absorción y dispersión de la luz solar, acompañados de una notable reducción de la visibilidad. Los aerosoles de tamaño comprendido entre 1,4 y 0,8  $\mu\text{m}$  son los que tienen un mayor influencia en la dispersión, debido a la proximidad de su tamaño a la longitud de onda de la luz visible.

#### 4.6 Efectos sobre el clima

Las partículas finas presentes en la atmósfera pueden tener efectos sobre el clima. Su acción sobre la radiación solar es doble: por una parte difunden la luz incidente y por la otra, absorben una parte de esta radiación, lo que produce un calentamiento de las partículas y la emisión de la radiación infrarroja.

Los efectos atmosféricos dependen de la altitud a la que las partículas se encuentren. Las situadas a baja altura disminuyen el flujo solar sobre el suelo, pero contribuyen a aumentar el efecto invernadero. A más altura predomina el efecto de barrera solar produciendo enfriamiento en la parte inferior de la atmósfera y calentamiento de la estratosfera. Las partículas pueden causar también efectos indirectos actuando como núcleo de condensación de vapor de agua, el cual, juega un importante papel en los cambios de temperatura.

## 5. Control de la contaminación por partículas.

Los métodos para el control de la contaminación ambiental han experimentado un gran avance tecnológico desde que se tomó conciencia en los países industrializados de la degradación del entorno. Las técnicas tradicionales de análisis se han adaptado con más o menos fortuna y han aparecido otras nuevas, dando lugar a nuevos enfoques y a la aparición de disciplinas cuyo fin es el conocimiento del medio.

En lo referente a la contaminación atmosférica debido a contaminantes químicos, los métodos de análisis y evaluación que se emplean en todo el mundo se reparten en los dos grandes campos analíticos que son los análisis de gases y los análisis de partículas. La experiencia viene demostrando que las partículas que teóricamente deberían ser fáciles de evaluar, encierran más complicaciones de las que se podría esperar en principio, dificultando su seguimiento y control.

Existe un creciente interés por conocer el origen de las partículas atmosféricas así como la contribución relativa de las principales fuentes de emisión, ya que ante un problema concreto, su conocimiento resulta imprescindible para buscar soluciones al mismo.

Actualmente casi todos los métodos de medición de la concentración de partículas sólidas son incapaces de discriminar el origen de estas, de tal forma que tanto las naturales como las artificiales son evaluadas conjuntamente para establecer la calidad del aire, criterio que es correcto si se consideran también a las partículas naturales como contaminantes. Pero se debe tener en cuenta, independientemente de esta afirmación, que las de origen antropogénico son las que el hombre tiene la posibilidad de controlar y de determinar su procedencia. En las otras, por el momento, se sigue a merced de los fenómenos de la naturaleza, de aquí la importancia de conocer que parte corresponde a cada cual en la totalidad de las partículas presentes en la atmósfera con el fin de conseguir un aumento en la calidad del medio y establecer de antemano si una minimización de las partículas artificiales tendría realmente efectos apreciables en el entorno.

Como ejemplo de control de la contaminación por partículas es el implando por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía para la determinación de partículas. Son varias las redes de partículas implantadas. La Agencia de Medio Ambiente y Agua de la Junta de Andalucía, tiene la tarea de realizar las analíticas gravimétricas de las redes de medida de PM

10 y PM 2,5 y así como el posterior estudio de las partículas. Son varias las redes de partículas implantadas en la actualidad, a continuación se describe de forma breve tres de estas redes.

### 5.1 Red de PM 10

Su finalidad es realizar una evaluación de las partículas de PM 10, de metales y de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), en toda Andalucía. Para ello se han distribuido captadores de alto volumen por toda Andalucía con el fin de muestrear las partículas de PM 10. Estos muestreos deben realizarse tal y como se indica en el R.D. 102/2011, el cual indica que se debe muestrear el 14% del año, es decir unos 65 días del año. Los muestreos con estos captadores permiten analizar los HAP y los metales de las partículas PM 10 tal y como se exigen en el real decreto 102 del año 2011.

En estos captadores se muestrean con filtros de 203 x 254 mm de sección rectangular, los cuales debido a su gran tamaño, permiten con un solo muestreo, obtener los valores de los parámetros de HAP y metales. La lista de los metales y los HAP de la Tabla.5-1. Relación de contaminantes a determinar en las partículas PM 10, indican cuales son los contaminantes a evaluar indicados por el R.D. 102 del 2011.

Tabla.5-1. Relación de contaminantes a determinar en las partículas PM 10

HAP:	Metales:
- Benzo (b) fluoranteno	Arsénico
- Benzo (a) pireno	Cadmio
- Indeno (1,2,3-cd) pireno	Níquel
- Benzo (j) fluoranteno	Plomo
- Benzo (k) fluoranteno	
- Benzo (a) antraceno	
- Dibenzo (a, h) antraceno	
- Indeno (1,2,3-cd) pireno	

Los captadores destinados para los muestreos de las partículas PM 10 están situados en las estaciones de la red de vigilancia de la calidad del aire de la junta de Andalucía, RVCCA. En la imagen que se muestra a continuación se puede apreciar la distribución de las estaciones por todo el territorio Andaluz.

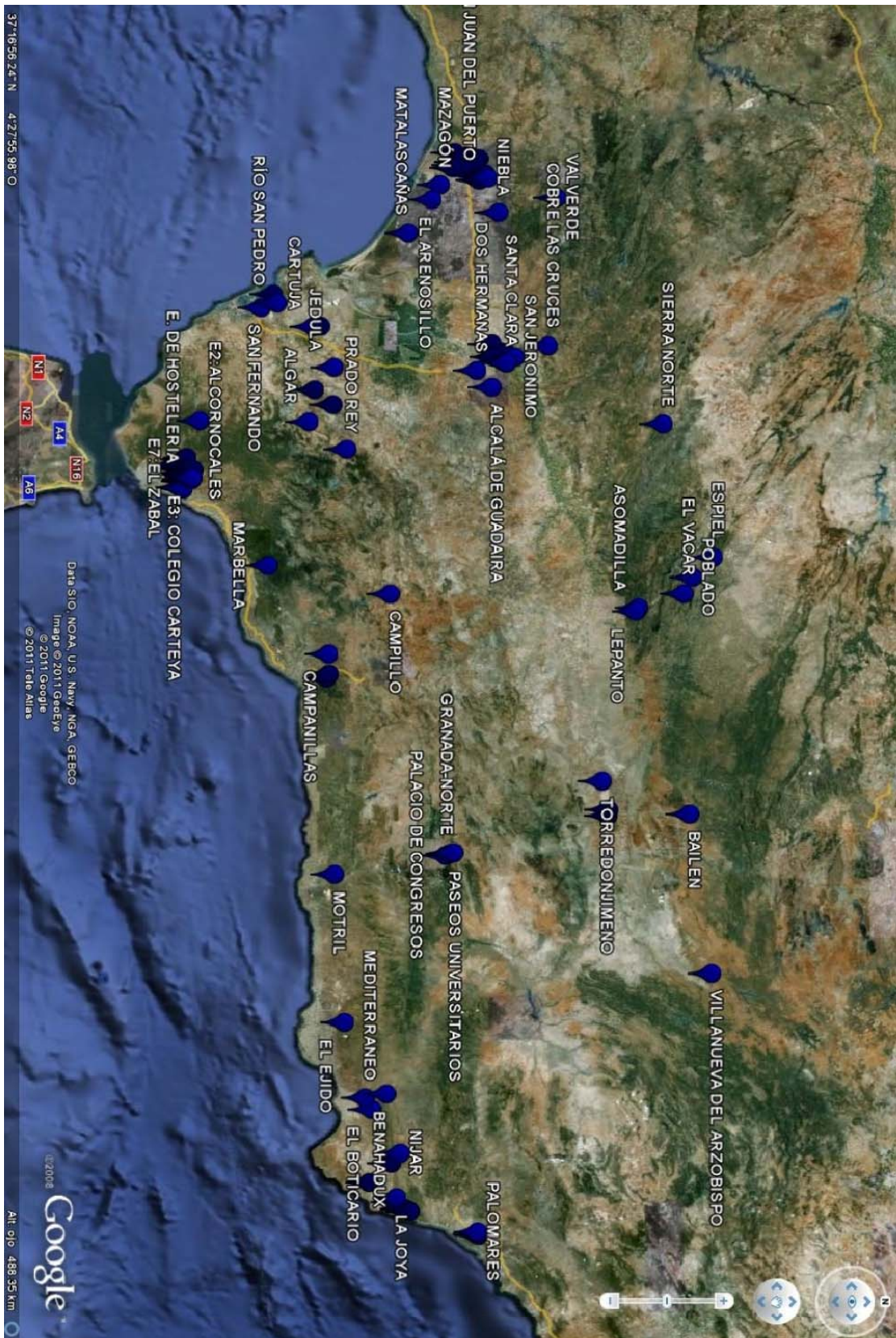


Figura.5-1. Distribución de las cabinas de la Red de vigilancia y Control de la Contaminación del Aire de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. (Imagen obtenida de la



aplicación Google Earth).

## 5.2 Red de PM 2,5

La principal finalidad de esta red es determinar la concentración de partículas PM 2,5 en toda Andalucía. Para el estudio, se programado la mayoría de los muestreos de forma secuencial cada mes del año en la mayoría de los puntos de muestreo. Dichos muestreos, el transporte de muestras y la conservación de las muestras se realiza como se indica la norma UNE-En 14907:2006. Se han distribuido captadores de PM 2,5 en Andalucía, ubicándolos en las cabinas para la evaluación de calidad del aire de la Junta de Andalucía.

## 5.3 Red IME

Es el “Índice medio de exposición a la población de partículas PM 2,5”. Para realizar esta determinación se han colocado 4 captadores tal y como se describe en el R.D. 102/2011 y se realizan muestreos según la norma de PM 2,5 cada tres días. Esta red es de ámbito Europeo de forma que se debe realizar este muestreo de forma sincronizada en toda Europa. Las evaluaciones se irán realizando cada tres años hasta el año 2020.

El documento que rige los muestreos del IME indica que las ubicaciones en las que se ha de situar los captadores destinados al muestreo, ha de ser un emplazamiento el cual no tuviese cambios drásticos en sus alrededores hasta el año 2020. Teniendo en cuenta este factor, estos captadores han sido ubicados en cabinas para la evaluación de la calidad del aire, en Sevilla, en Córdoba, en Granada y en Málaga.

## 6. Partículas captadas para la medida de calidad del aire

La contaminación de partículas por inmisión son aquellas que acompañan el flujo de los gases que abandonan un foco de contaminación atmosférica. Para determinar el origen de las partículas suspendidas en el aire hay que tener en cuenta una serie de factores, como son el transporte y dispersión de las partículas desde el foco, el momento y lugar determinado en el que se realiza la medida, y la sedimentación en función del tamaño de las mismas.

En función del tipo de evaluación a realizar, se ha de definir una estrategia y metodología del muestreo, teniendo en cuenta algunos aspectos como:

- El número de puntos donde se realizará la toma de muestras.
- El tamaño de las partículas (permanencia en el aire).
- La composición química (características buscadas).
- La localización de los equipos y material para la toma.
- La existencia de focos diversos de contaminación de origen antropogénicos.
- La identificación de otros focos de emisión fugitiva y origen natural.

A diferencia de las emisiones, los contaminantes en inmisión se presentan en concentraciones muy bajas, lo que hace necesario muestrear grandes cantidades de gas o prolongar los períodos de muestreo.

En inmisión hay dos tipos de partículas las que sedimentan y las que se mantienen en suspensión. (El decreto 151/2006 de la junta de Andalucía, es el que regula en Andalucía estas partículas).

- Para las partículas que sedimentan, puede ser suficiente disponer de un sistema de recogida que facilite la deposición de partículas en un recipiente con superficie conocida y que permita su recolección sin pérdidas por ráfagas fuertes de vientos o lluvia.
- Para las partículas en suspensión, se utilizan bombas de aspiración que permiten que se filtre el aire succionado, permaneciendo las partículas retenidas en un soporte (platos de colección, filtros, etc.). Así mismo es posible separarlas por tamaños mediante ciclones u

otros medios de clasificación selectiva, esa separación permite obtener en los soportes de muestreo las partículas totales, las PM 10 y las PM 2,5.

## 6.1 Determinación de partículas en inmisión

La medida de las inmisiones, teóricamente, es más compleja que la medida de las emisiones debido a que implica numerosas fuentes de producción que contribuyen con sus aportes a la atmósfera con diverso material particulado. Tanto las fuentes naturales como las antropogénicas conforman esta compleja mezcla que incluye partículas procedentes del polvo, sales marinas, fuegos forestales, volcanes, procesos industriales, etc.

Existen varios métodos para la evaluación de la inmisión, unos directos y otros indirectos. Dentro de éstos se engloban los modelos matemáticos que permiten una primera aproximación, destacando:

### 6.1.1 Modelos de dispersión.

Los modelos de dispersión, se basan en el estudio de la tasa de emisión y los factores de dispersión para una fuente específica y calculan el impacto en el sitio receptor.

Son los medios convencionales de predecir el impacto ambiental de una fuente de emisión sobre la calidad del aire.

Los modelos de dispersión establecen que la contribución de una fuente  $j$  a un receptor  $S_j$ , es el producto de una tasa de emisión  $E_j$  y un factor de dispersión  $D_j$

$$S_j = D_j \cdot E_j$$

Las fórmulas de dispersión son generalmente clasificadas por la fórmula geométrica de la fuente de emisión, dando lugar a expresiones para punto, línea y área de fuentes.

Una meta básica de calidad del aire es calcular el factor de dispersión para una geometría de fuente dada, conociendo parámetros meteorológicos como dirección y velocidad del viento y estabilidad atmosférica.

Los modelos de dispersión se basan en inventarios de emisiones de contaminantes y el estudio de su distribución posterior en la atmósfera. La ley de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental, Ley 7/2007, de 9 de Julio, indica la obligación de hacer estos estudios.

### 6.1.2 Modelos de receptor

Los modelos de receptor comienzan con el estudio de las características del aerosol en el sitio receptor y después calculan la contribución específica de un tipo de fuente. Las características medibles incluyen tamaño de partícula, morfología, distribución de tamaño de las partículas de la masa, identificación de sus componentes (orgánicos, inorgánicos y radioactivos) y composición química. Aunque la mayoría de estas características pueden ser utilizadas para investigar los distintos tipos de fuentes, los únicos parámetros que pueden ser usados para determinar cuantitativamente la contribución de una fuente a los niveles de partículas del aire, son la concentración de componentes o el número de partículas de cada tipo específico y de cada tamaño.

Los modelos de receptor están basados en la comparación de las características del aerosol ambiental con las características del aerosol de la fuente de emisión. Parten, por tanto, del conocimiento de la composición química de las partículas en el sitio receptor y en las posibles fuentes, llegando a determinar la contribución de cada fuente específica.

Los modelos de dispersión pueden ser químicos o microscópicos, en este trabajo solo se mencionarán los correspondientes a los químicos.

#### **Modelos de dispersión Químicos:**

Los modelos de dispersión químicos, a su vez pueden ser subdivididos en cinco subgrupos. Todos estos modelos requieren el conocimiento de la composición química tanto del aerosol como de las posibles fuentes. Tienen el inconveniente de que resulta difícil la resolución de fuentes con similares características químicas.

#### **a) Balance Químico Elemental**

El método de balance Químico Elemental asume que la masa del aerosol se conserva en el tiempo. Es decir, una especie química que es emitida desde su fuente, al cabo de un tiempo es medida en el receptor

Los métodos de balance químico elemental consideran que la composición química de las partículas en el punto receptor es una combinación lineal de las concentraciones en las partículas en la fuente de emisión.

### **b) Modelos Multivariantes**

Extraen información sobre la contribución de una fuente, basándose en la varianza de los elementos medidos en un gran número de filtros. Si dos o más elementos se originan en la misma fuente, su varianza como función del tiempo, medida en el mismo receptor, será similar. Utilizan por tanto la información contenida en las correlaciones e interacciones entre elementos, para generar un conjunto de factores que puedan ser interpretados como indicativos de los distintos tipos de fuentes de partículas

### **c) Factor de Enriquecimiento**

En los modelos de factor de enriquecimiento se establece que existe algún elemento en el aerosol ambiental que es producido casi exclusivamente por la contaminación natural de fondo. Esto es,

$$\text{Factor de enriquecimiento} = (C_k / C_r)_{\text{muestra}} / (C_k / C_r)_{\text{fondo}}$$

- Cr: la normalización del elemento característico de la contaminación de fondo
- Ck: es el elemento cuyo enriquecimiento va a ser determinado

Los elementos con factor de enriquecimiento mayor que uno, indican la existencia de fuentes locales que emiten a la atmósfera dicho elemento.

Estos modelos son muy sencillos, ya que sólo se requiere un conocimiento rudimentario de la composición química de dichas fuentes para hacer posible la asignación.

### **d) Series Temporales**

Las concentraciones de las especies químicas originadas en una misma fuente tienen una evolución similar en el tiempo cuando se miden en un mismo punto receptor.

La dispersión atmosférica influye considerablemente en la evolución en el tiempo de los niveles de contaminación por partículas. Así, por ejemplo, en condiciones de estabilidad térmica y con una baja velocidad de viento, es previsible un aumento en general de las concentraciones de los

constituyentes de la materia particulada; de forma análoga, cabe esperar una disminución de los niveles de contaminación con la presencia de lluvias y fuertes vientos. Para minimizar el impacto de las condiciones de dispersión, se han propuesto normalizaciones de los resultados.

Estudios de períodos cortos basados en informaciones horarias proporcionan información sobre fuentes variables en cortos períodos como calefacciones de casas, tráfico, procesos industriales, etc. Períodos largos de estudio pueden mostrar fácilmente el impacto de la estacionalidad y de las medidas de control, pero no proporcionan determinaciones cuantitativas de tipos de fuentes específicas.

Los estudios de series temporales no permiten una estimación cuantitativa de la contribución de los distintos tipos de fuentes.

#### **e) Modelos de Distribución Espacial.**

En estos modelos se comparan las concentraciones de diversos elementos de muestras tomadas en un mismo periodo de tiempo, en puntos receptores diferentes. La información sobre la contribución de las fuentes se obtiene a partir del estudio conjunto de la distribución espacial de elementos y de la localización y composición química de las fuentes conocidas de emisión.

### **6.1.3 Captadores de partículas en suspensión.**

Existen una gran variedad de aparatos para medir las partículas suspendidas en el aire, que emplean diversos sistemas que cubren cualquier necesidad. Suelen clasificarse según el caudal de aspiración, según el método de análisis, según el tipo de cabezal empleado, etc.

#### **a) Captadores de alto/medio volumen.**

Son aquellos captadores que emplean volúmenes de aspiración que van normalmente desde 20 m<sup>3</sup> a 90 m<sup>3</sup>. Se emplean para atmósferas poco cargadas de partículas o bien para conseguir tiempos cortos de muestreo. En la Figura siguiente se puede ver un captador de este tipo que puede emplear distintos cabezales.

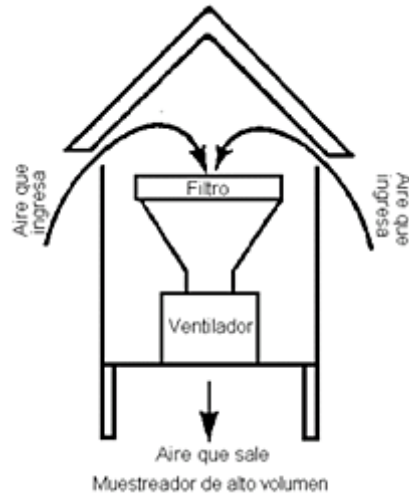


Figura.6-1. Ejemplo de funcionamiento de captador de partículas

b) Captadores de bajo volumen.

Los caudales de aspiración que emplean están por debajo de  $20\text{m}^3$ . Se utilizan para períodos largos de muestreo o en atmósferas muy cargadas. Existen captadores de este tipo que simulan la respiración humana. Actualmente en el mercado los hay que permiten el muestreo secuencial y los que no lo permiten.



Figura.6-2. Captadores de bajo volumen.

c) Analizadores gravimétricos.

Emplean como medio de evaluación de concentración de partículas la pesada directa sobre una balanza.

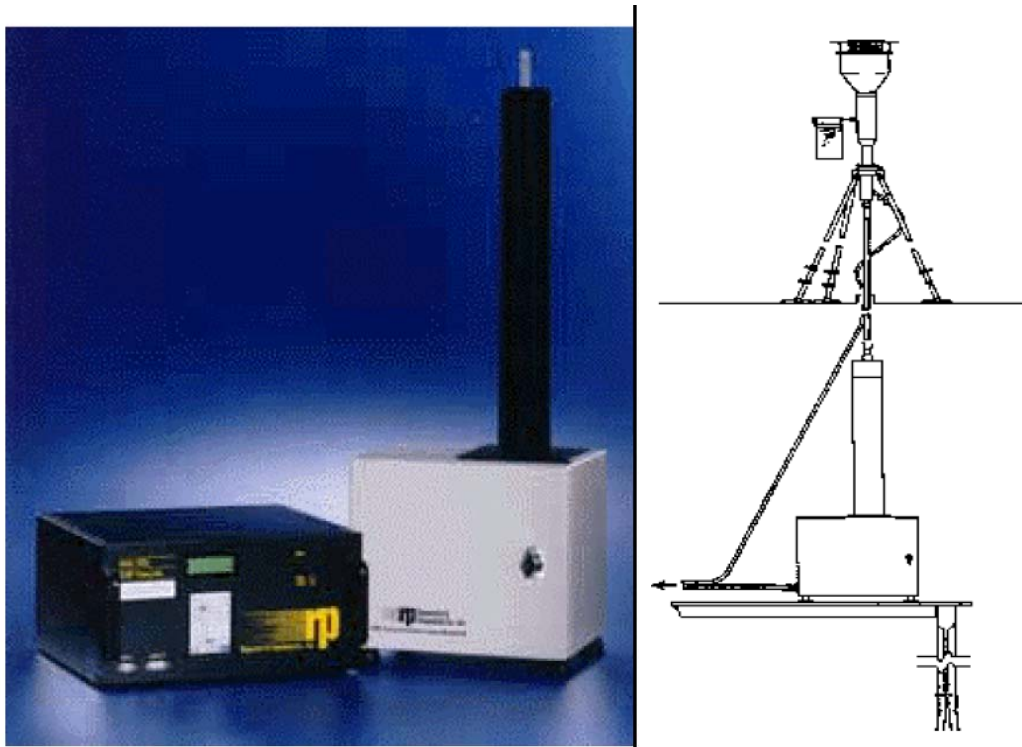


Figura.6-3. Analizador Gravimétrico

d) Analizadores nefelométricos.

Están basados en la comparación de una escala de grises con la muestra aspirada, extrapolando el dato en valores de concentración.

e) Captadores de radiación Beta.

Evalúan la concentración de partículas basándose en la atenuación que presenta un haz de radiación  $\beta$  al pasar por un filtro de fibra donde se aspira un volumen de aire conocido. Siendo proporcional el nivel de radiación absorbida con la cantidad de partículas que quedan retenidas en el filtro.

Estos aparatos junto con los nefelométricos están indicados para la medida de la inmisión en continuo y se prestan fácilmente para la transmisión y tratamiento automáticos de los datos de medidas de partículas.

f) Captadores con cabezales.

Independientemente del caudal de aspiración y del sistema de análisis que empleen, los captadores pueden contar con sistemas que establezcan o no el diámetro de corte (o tamaño aerodinámico equivalente), y evalúen una determinada población de partículas en suspensión.



Así podemos encontrar aparatos con cabezales PM-10 (que recolectan las partículas menores de 10  $\mu\text{m}$ ), no PM-10 (sin cabezal limitador), PM-2 (que captan las menores de 2  $\mu\text{m}$ ), etc., llegando a los más sofisticados como son los captadores de polen y los de etapas múltiples que separan simultáneamente diversos tamaños de partículas.

En la fotografía se puede observar un captador de alto volumen, con cabezal PM-10, que emplea un separador de haz tubular que permite que las partículas mayores de 10  $\mu\text{m}$  queden retenidas en un lecho de sílica gracias al efecto de deposición inercial y las menores pasen a un filtro de fibra de vidrio, de cuarzo o de celulosa.



Figura.6-4. Captador de alto volumen.

## 7. Legislación aplicable

### 7.1 Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.

Este real decreto viene como transposición de la directiva europea conocida como la directiva CAFÉ, DIRECTIVA 2008/50/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa que ha venido a modificar el anterior marco regulatorio comunitario, sustituyendo la Directiva Marco y las tres primeras Directivas:

- La Directiva 96/62/CE del Consejo, de 27 de septiembre de 1996, sobre evaluación y gestión de la calidad del aire, también conocida como Directiva Marco.
- Directiva 1999/30/CE del Consejo, de 22 de abril de 1999, relativa a los valores límite de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas y plomo en el aire ambiente, modificada por la Decisión de la Comisión 2001/744/CE, de 17 de octubre;
- Directiva 2000/69/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de noviembre de 2000, sobre los valores límite para el benceno y el monóxido de carbono en el aire ambiente;
- Directiva 2002/3/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 12 de febrero de 2002 relativa al ozono en el aire ambiente;
- Directiva 2004/107/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de diciembre de 2004 relativa al arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente.

Además de las sustituciones anteriores, el RD 102/2011, también introduce regulaciones para nuevos contaminantes, como las partículas de tamaño inferior a 2,5 micrómetros, y nuevos requisitos en cuanto a la evaluación y la gestión de la calidad del aire ambiente. Ello hace necesario incorporar al derecho interno estas novedades.

El Real decreto 102/2011, acoge la legislación que estaba vigente hasta el momento en un solo documento no variando los criterios establecidos para las partículas PM 10 y para las partículas PM 2,5, como se resume a continuación:

Se definen las actuaciones a realizar por todas las administraciones públicas implicadas en la gestión de la calidad del aire. Por otra parte, y para cada uno de los contaminantes, excepto el amoníaco, establece objetivos de calidad del aire que han de alcanzarse, mediante una planificación y una toma de medidas adecuada, en las fechas que se fijan con la determinación de los correspondientes valores límite u objetivo. Igualmente fija los métodos y criterios comunes para realizar la evaluación de la calidad del aire que, dependiendo de los niveles de los contaminantes, deberá realizarse mediante mediciones, una combinación de mediciones y modelización o solamente modelización y, en función de los resultados obtenidos en esta evaluación, fija los criterios de gestión para lograr el mantenimiento de la calidad del aire o su mejora cuando sea precisa, conforme a los planes de actuación que al respecto se adopten, incluyendo, asimismo, las medidas más severas previstas para los episodios en que puedan ser superados los umbrales de alerta o información fijados.

### **7.1.1 ANEXO VII del R.D 102/2011**

En el Anexo VII del Real Decreto 102/2011, se indican cuales son los métodos de referencia para la medida de los diferentes compuestos, a continuación:

-Métodos de referencia para la evaluación de las concentraciones de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas (PM10 y PM2,5), plomo, benceno, monóxido de carbono, ozono, arsénico, cadmio, mercurio, níquel e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) (artículos 3.2, 7 y 11)

-Método de referencia para la toma de muestras y la medición de plomo

El método de referencia para la toma de muestras de plomo es el que se describe en la sección A, apartado 4, del presente anexo. El método de referencia para la medición de plomo es el que se describe en la norma UNE-EN 14902:2006 «Calidad del aire ambiente-Método normalizado para la medida de Pb, Cd, As y Ni en la fracción PM10 de la materia particulada en suspensión».

-Método de referencia para la toma de muestras y la medición de PM10

El método de referencia para la toma de muestras y la medición de PM10 es el que se describe en la norma UNE-EN 12341:1999 «Calidad del aire-Determinación de la fracción PM10 de la materia particulada en suspensión-Método de referencia y procedimiento de ensayo de campo para demostrar la equivalencia de los métodos de medida al de referencia».

-Método de referencia para la toma de muestras y la medición de PM 2,5

El método de referencia para la toma de muestras y la medición de PM 2,5 es el que se describe en la norma UNE-EN 14907:2006 «Calidad del aire ambiente-Método gravimétrico de medida para la determinación de la fracción másica PM2,5 de la materia particulada en suspensión».

### 7.1.2 Anexo I del R.D 102/2011

En el Anexo I del Real Decreto 102/2011 se indican los objetivos de calidad del aire para los distintos contaminantes, coincidiendo con los marcados por la legislación anterior.

El Real decreto 1073/2002, de 18 de octubre, sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente en relación con el dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, óxidos de nitrógeno, partículas, plomo, benceno y monóxido de carbono, dictaba para partículas PM 10: Anexo II, Fase I, los valores se muestran en la siguiente tabla.

Tabla.7-1. Valores objetivo y límite de las partículas PM 10 en condiciones ambientales para la protección de la salud.

	Período de promedio	Valor límite	Margen de tolerancia	Fecha de cumplimiento del valor límite
1. Valor límite diario.	24 horas.	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , que no podrán superarse en más de 35 ocasiones por año.	50% (1).	En vigor desde el 1 de enero de 2005 (2).
2. Valor límite anual.	1 año civil.	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20% (1).	En vigor desde el 1 de enero de 2005 (2).

(1) Aplicable solo mientras esté en vigor la exención de cumplimiento de los valores límite concedido de acuerdo con el artículo 23.

(2) En las zonas en las que se haya concedido exención de cumplimiento, de acuerdo con el artículo 23, 11 de junio de 2011.

- Valor límite diario para la protección de la salud humana, durante 24 horas, el valor límite, es de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM 10 que no podrán superar en más de 7 ocasiones por año. Este valor ha de cumplirse desde el 1 de enero del año 2010.

- Valor límite anual para la protección de la salud humana, durante un año civil, el valor límite, es de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM 10. Este valor ha de cumplirse desde el 1 de enero del año 2010.

Otro contaminante que también nos marca este Real Decreto es el plomo y que también se puede determinar con las partículas realizándoles un posterior análisis químico a los filtros que han retenido las partículas. En el Anexo IV tenemos los valores límites de plomo en condiciones ambientales:

- Valor límite anual para la protección de la salud humana, durante un año civil, el valor límite, es de  $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de Pb. Este valor ha de cumplirse desde el 1 de enero del año 2005, para el caso de las inmediaciones de las zonas industriales específicas serían aplicables a partir del 1 de enero del 2010. Los valores indicados en el decreto para PM 2,5 se muestran en la siguiente tabla.

Tabla.7-2.Valores objetivo y límite de las partículas PM 2,5 en condiciones ambientales para la protección de la salud

	Período de promedio	Valor	Margen de tolerancia	Fecha de cumplimiento del valor límite
Valor objetivo anual.	1 año civil.	$25 \mu\text{g}/\text{m}^3$	–	En vigor desde el 1 de enero de 2010.
Valor límite anual (fase I).	1 año civil.	$25 \mu\text{g}/\text{m}^3$	20% el 11 de junio de 2008, que se reducirá el 1 de enero siguiente y, en lo sucesivo, cada 12 meses, en porcentajes idénticos anuales hasta alcanzar un 0% el 1 de enero de 2015, estableciéndose los siguientes valores:  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2008; $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2009 y 2010; $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2011; $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2012; $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2013 y 2014	1 de enero de 2015.
Valor límite anual (fase II) (1).	1 año civil.	$20 \mu\text{g}/\text{m}^3$	–	1 de enero de 2020.

(1) Valor límite indicativo que deberá ratificarse como valor límite en 2013 a la luz de una mayor información acerca de los efectos sobre la salud y el medio ambiente, la viabilidad técnica y la experiencia obtenida con el valor objetivo en los Estados Miembros de la Unión Europea.

## 7.2 Decreto 151/2006, de 25 de Julio, de la Junta de Andalucía.

El decreto 151/2006, de 25 de Julio, de la Junta de Andalucía establece los valores límites y la metodología a aplicar en el control de las emisiones no canalizadas de partículas por actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera.

Valores límites a aplicar:

- Partículas totales en suspensión (valor medio de 24 horas):  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Partículas sedimentables (valor medio del periodo de muestreo):  $300\text{mg}/\text{m}^2$  por día.

Basándonos en lo anterior, se hace necesaria la medida del material particulado en el aire ambiente. Estas medidas han de realizarse en las zonas y con la frecuencia indicada en el Real Decreto 102/2011.

Para la realización de las medidas, cada comunidad autónoma tiene sus puntos de muestreos y en concreto Andalucía los tiene gestionados por la Consejería de Medio Ambiente (CMA), llamados “Red de vigilancia de la contaminación ambiental”. Esta red está formada por una serie de cabinas equipadas con los equipos necesarios para poder realizar las medidas (toma de muestra) de partículas en suspensión al igual que otros contaminantes. Además de la red de vigilancia, en Andalucía se dispone de las Unidades Móviles de Inmisión (UMI), las cuales se colocan en las diferentes localidades según la necesidad de realizar dichas medidas, de partículas o de los contaminantes que se crean oportunos.