

LAS PARTÍCULAS DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA ALTERACIÓN DE LA PIEDRA

1. La contaminación atmosférica

Entre los principales factores que intervienen en la *degradación de los materiales pétreos* (agua, sales...), ocupa un lugar destacado la contaminación atmosférica. Este hecho se ha puesto claramente de manifiesto en el presente siglo observando la relación existente entre contaminación y deterioro (Winkler, 1997).

Se entiende por *contaminación atmosférica* la presencia en el aire de materia o energía en cantidades anómalas -alterando su composición química o sus propiedades físicas-, con efectos nocivos para los seres vivos (respecto a su salud o calidad de vida), o que afecta a la durabilidad de los materiales.

Los principales *productos contaminantes* vertidos directamente a la atmósfera, de acuerdo con su naturaleza y abundancia, son los siguientes (se indica el orden de magnitud de las emisiones generadas en Estados Unidos en porcentaje en peso):

- Gases: CO (50 %), SO₂ (15 %), NO_x (10 %) y COV (15 %).
- Partículas: sólidas, líquidas o mixtas (10 %).

En cuanto al origen o procedencia de los contaminantes atmosféricos, se establecen dos categorías en relación con la influencia humana en su génesis:

- *Naturales*, contaminantes generados por la actividad terrestre o de los seres vivos (actividad volcánica, acción del viento sobre el suelo o en el océano, incendios forestales, procesos metabólicos, descomposición de la materia orgánica...). La contaminación producida es asumida por la propia dinámica terrestre, de forma que la atmósfera se mantiene en equilibrio.
- *Antrópicos*, contaminantes relacionados con actividades humanas recientes, la mayor parte (80 %) se deben a la obtención de energía a partir de combustibles fósiles, el resto (20 %) a procesos industriales, medios de transporte y a la eliminación de residuos, principalmente. En este caso el contenido en algunos contaminantes se está incrementando rápidamente y parece estar perdiéndose el equilibrio que ha existido hasta el presente.

Los contaminantes antrópicos son producidos mayoritariamente por *fuentes o focos* de carácter local, y de acuerdo con su distribución espacial pueden ser:

- Puntuales, fijos o estacionarios (ej.: central térmica).
- Lineales o móviles (ej.: autopista).
- Zonales, compuestos o múltiples (ej.: ciudad, polígono industrial).

La contaminación antrópica se concentra en áreas geográficas pequeñas, densamente pobladas. La contaminación natural es mayor pero sus fuentes están muy repartidas en toda la tierra, y su distribución y dispersión hacen que la contaminación sea baja.

Los diferentes contaminantes emitidos por las distintas fuentes *se difunden* (los gases) y *se dispersan* (las partículas) en la atmósfera, mezclándose y diluyéndose. Un factor fundamental en su concentración es el movimiento de las masas de aire. El *grado de contaminación* que presenta un determinado lugar depende de los aportes de contaminantes, de las características climáticas de la zona y de las condiciones meteorológicas del momento.

Los contaminantes en la atmósfera *evolucionan*, reaccionan entre sí, y sufren cambios en su composición, tamaño, estado físico...; cambios que dependen de la asociación de contaminantes y de las condiciones atmosféricas. En este sentido, en cuanto su formación, también se distingue entre:

- *Primarios*, contaminantes directamente emitidos en los focos, por fenómenos naturales o actividades humanas (partículas, CO, SO₂, NO_x, COV...).
- *Secundarios*, contaminantes formados en la atmósfera a partir de los anteriores, por reacciones entre ellos (oxidantes fotoquímicos, lluvia ácida...).

Los contaminantes finalmente *son eliminados* de la atmósfera por procesos naturales; los gases pueden condensarse, ser absorbidos por sustratos sólidos o ser disueltos en los océanos; los sólidos tienden a coagularse, a crecer de tamaño y terminan sedimentando. Cada contaminante tiene un *tiempo de residencia* en la atmósfera o una vida media, que influye en el carácter de la contaminación que genera; así, los contaminantes cuyo tiempo de residencia es:

- Corto (horas a un día), generan contaminación local (ej.: partículas gruesas).
- Medio (una semana), contaminación regional (ej.: SO₂).
- Largo (varios meses), contaminación global (ej.: CO₂).

La contaminación es un *proceso dinámico* que depende de los aportes en las fuentes, de la capacidad difusora de la atmósfera y del ritmo de depósito en los sumideros; en consecuencia sus valores están variando en el espacio y en el tiempo. En el análisis de la contaminación hay que diferenciar entre:

- *Valores de emisión*, obtenidos en los propios focos emisores, son característicos del potencial contaminante de cada foco. Se expresan en masa de contaminante aportada a la atmósfera por unidad de tiempo.
- *Valores de inmisión*, propios de zonas que no estén afectadas por un foco concreto, característicos de la contaminación del aire, de la calidad del aire respirado. Se expresan en masa de contaminante contenida en la atmósfera por unidad de volumen.

Cada contaminante presenta un *valor de fondo* o valor mínimo, obtenido en zonas distantes de cualquier tipo de fuente. Por otra parte, a la hora de valorar los datos de inmisión de una determinada zona, la legislación establece unos valores guía y unos valores de referencia.

Las fuentes emiten simultáneamente varios tipos de contaminantes, por lo que éstos se presentan *asociados*, interrelacionados, siendo difícil evaluar sus *efectos* de forma individual. Por ejemplo: las partículas con frecuencia absorben gases (SO₂, NO_x, COV), también pueden ser higroscópicas y por deliquesencia formar aerosoles líquidos, con productos contaminantes en disolución; los gases pueden disolverse en el agua, también por condensación o reacción pueden pasar al estado líquido o terminar como partículas sólidas. Esta asociación de contaminantes incrementa los daños producidos, ya que su comportamiento es típicamente sinérgico.

El *efecto de la contaminación* está relacionado con el tiempo de residencia de los contaminantes en la atmósfera, en este sentido se distingue:

- *Tiempos de residencia largos*, estos contaminantes tienen una acción a largo plazo sobre la atmósfera, que puede afectar a la dinámica terrestre; es el caso del CO₂, CH₄ y N₂O, que producen el efecto invernadero.
- *Tiempos de residencia cortos*, en este caso los contaminantes producen daños en poco tiempo sobre los organismos vivos o los materiales; los más comunes son las partículas, el SO₂, NO_x y COV.

Las superficies pétreas expuestas a la intemperie (junto a suelos y océanos) actúan de sumidero de los contaminantes, y su *depósito es un proceso acumulativo*. De acuerdo con los mecanismos que interviene en su eliminación de la atmósfera, y también en relación con sus efectos sobre los materiales, se distingue dos tipos de depósito de contaminantes:

- *Depósito seco*, formado por sedimentación de partículas o absorción de gases.
- *Depósito húmedo*, relacionado con las distintas formas de precipitación que puedan existir (lluvia, nieve, niebla...).

Los daños generados por los contaminantes sobre los materiales pétreos de edificación pueden agruparse en dos categorías:

- *Depósitos superficiales*, constituidos por acumulación de partículas poco cohesionadas (polvo, capa de suciedad...). Se presentan en ambiente seco, en zonas favorables al depósito seco de contaminantes. Los daños producidos son fundamentalmente estéticos y se reducen a cambios en el color y aspecto de la superficie pétreo, debidos a ensuciamiento.
- *Costras y disgregaciones*, cuando los contaminantes reaccionan con la piedra y, como consecuencia de dicho ataque químico, se generan nuevos productos. Se presentan en ambientes húmedos, en zonas de depósito húmedo o zonas favorables a la retención de humedad. Los daños son ahora más importantes, mostrando capas en o sobre la piedra de espesor variable, de distinta naturaleza y coherencia.

2. Partículas

Definiciones

Las partículas son un componente común y significativo de la atmósfera, sobre todo de la troposfera, donde juegan un papel fundamental en la génesis de la lluvia y en el balance térmico de la tierra. Cuando el contenido en partículas en la atmósfera supera determinados niveles se consideran un producto contaminante.

En el ámbito de la contaminación atmosférica se denomina *partícula* a toda sustancia sólida, líquida o mezcla de ambas, dispersa en el aire. El término *aerosol* se reserva para partículas de pequeño tamaño, frecuentemente líquidas, que se presentan en suspensión en el aire. La expresión *materia particulada en suspensión* (MPS) también se utiliza con similar significado.

Las partículas se caracterizan por ser muy variables en composición (sólo se excluye el agua pura) y en tamaño (de más de 500 μm a 1 nm, típicamente de 25 a 0,1 μm), y por tener una génesis compleja: proceden de diversas fuentes y pueden evolucionar de distintas maneras.

Existen muchos términos relacionados con la materia particulada, a los que se atribuye en distinto grado connotaciones genéticas, composicionales o texturales:

- *Grano* ("grain"), se utiliza para tamaños comprendidos entre 2 mm y 62 μm , visibles a simple vista, sólidos y mayoritariamente insolubles. Son levantados por el viento, se dispersan en la atmósfera y en cuanto hay calma depositan fácilmente por gravedad. Sólo tienen importancia como contaminantes en el entorno de las fuentes. En cuanto a su origen y composición, mayoritariamente son granos de *arena* ("grit"), de origen cortical (edáfico, terrígeno, volcánico...): proceden del suelo, de rocas meteorizadas y en general de la desintegración mecánica de materiales.

También pueden proceder de la vegetación, son las *esporas y los granos de polen* (microesporas de fanerógamas, desde 250 a 2 μm de tamaño).

- *Polvo* ("dust"), se aplica a partículas entre 62 μm (a veces 100 μm) y 1 μm , son visibles al microscopio óptico y mayoritariamente son sólidas e insolubles. Desde el punto de vista de su comportamiento en la atmósfera se suelen distinguir las superiores a 10 μm : *materia sedimentable*, de las inferiores: *materia en suspensión*. En relación con su origen y composición se distingue:

- 1) El *polvo* (s.e.) se asocia normalmente a partículas no relacionadas con la combustión y constituyen el contaminante más importante de este tipo. Puede proceder de distintas fuentes: a) ser de origen natural, de la corteza terrestre como la arena, b) producido por la industria, sobre todo la metalúrgica y de construcción en relación con procesos de molienda (de carbón, cemento...), c) ser de origen orgánico (polen, bacterias).

- 2) La *ceniza* ("ash") se refiere a partículas de tamaño similar generadas por combustión a elevadas temperaturas. En relación con su procedencia pueden tener un carácter local, como las cenizas volcánicas de origen natural, o generalmente son cenizas volantes ("fly ash") formadas por residuos de combustión, sobre todo en centrales térmicas de carbón.

- 3) El *hollín* ("soot") se usa para núcleos de carbón con presencia de otros contaminantes en su superficie acumulados por reacción y coagulación, cuando alcanza gran tamaño decanta con facilidad, y se distingue muy bien por su color negro y por que tizna. Está relacionado con procesos de combustión incompleta, con la formación de humos y CO, mayoritariamente en centrales térmicas y en motores diesel, siendo en este caso rico en hidrocarburos.

- *Humo* ("smoke", "fume"), está formado por partículas inferiores a 1 μm (a veces 2 μm) sólidas o líquidas, sólo visible al microscopio electrónico. El humo formado por partículas entre 1 y 0,1 μm es fácil de distinguir, ya que al tener ese tamaño la radiación visible dispersa la luz y reduce la visibilidad. Las partículas inferiores a 0,1 μm son más difíciles de observar al no dispersar la luz ni reducir la visibilidad. Este tipo de partículas se mantienen suspendidas en la atmósfera y son más abundantes lejos de los focos de emisión (representan el 80 % del total de partículas), también son las más importantes, ya que al ser inhalables generan daños en el hombre. En cuanto a su origen, puede ser:

- 1) *Humo de combustión*, debido a la combustión incompleta de combustibles fósiles: carbón, petróleo (el gas natural no produce humo) o madera. Se produce en centrales térmicas, motores diesel y en incendios forestales, generando un humo rico en carbón y en hidrocarburos (humo negro).

- 2) *Humo industrial*, debido a la volatilización de metales y a la posterior condensación de los vapores, acompañada generalmente de reacciones químicas de oxidación. Lo produce sobre todo la industria metalúrgica y química, y se caracteriza por ser un humo rico en óxidos metálicos (humo coloreado).

- 3) También puede producirse *humo por procesos naturales*, como ocurre en la descomposición de la materia orgánica.

- *Niebla* ("fog", "mist", "haze"), está formada mayoritariamente por gotitas líquidas inferiores a 10 μm , que se mantienen en suspensión en la atmósfera y reducen la visibilidad. Es debida a la condensación de vapor de agua y, en menor medida, de otros vapores, y tiene lugar normalmente sobre pequeños núcleos de condensación

(partículas higroscópicas). Puede formarse por procesos naturales en atmósferas más o menos limpias, es la *niebla no contaminante*, compuesta principalmente por vapor de agua. También se produce en ambiente marino por pulverización de agua marina, dando lugar a *bruma rica en aerosoles salinos*. Además puede ser debida a procesos industriales, es la *niebla contaminante*: niebla + humo ("smog"), formada por reacción gaseosa y condensación de vapores ácidos (SO₂) o alcalinos. Finalmente otro tipo es la *calima*: niebla + humo + polvo ("haze" o "smaze").

Génesis

En cuanto al origen de las partículas se pueden considerar distintos *criterios de clasificación* en relación con: la actividad humana (naturales o antrópicas), el grado de evolución (primarias o secundarias), el lugar de procedencia (suelo, océano, vegetación ...) o el proceso de formación (volcánico, eólico, combustión, descomposición...).

De acuerdo con todos esos criterios se tiene la siguiente clasificación:

- *Fuentes naturales*, generan el 90 % de las partículas, incluyen:
 - 1) Contaminantes *primarios* -favorecidos y a veces movilizados por el viento- pueden proceder de: volcanes (ceniza volcánica), suelos y rocas alteradas (arena y polvo terrígeno), mares y océanos (aerosoles salinos), bosques y vegetación (esporas, polen y bacterias), incendios forestales (ceniza, hollín y humo).
 - 2) Contaminantes *secundarios* (niebla), pueden venir de: hidrocarburos volátiles emitidos por la vegetación, descomposición bacteriana de materia orgánica.
- *Fuentes antrópicas*, generan el 10 % de las partículas, incluyen:
 - 1) Contaminantes *primarios*, pueden tener distintos orígenes: a) combustión de combustibles (generan cenizas, hollín y humo), por su procedencia se distingue entre: centrales térmicas (producción de energía eléctrica), usos domésticos urbanos (calefacción, agua caliente), procesos industriales (producción de energía) e incineración de residuos; b) procesos industriales excluida la combustión (generan polvo, humo y niebla), se puede distinguir entre: industria siderúrgica, metalúrgica y fundición, industria del cemento, materiales de construcción y minería, industria química, de alimentación, disolventes y otras; c) medios de transporte, la combustión tiene lugar en los motores y producen el 10 % de las partículas antrópicas (generan polvo, hollín y humo), se distingue entre tráfico de carretera, debida sobre todo a motores diésel, y de otros medios de transporte; d) procesos agrícolas y ganaderos (generan polvo, humo, niebla).
 - 2) Contaminantes *secundarios* (generan humo y niebla) pueden proceder de: a) reacciones entre gases (H₂S, SO₂, NO_x, NH₃); b) condensación de vapores.

Las partículas evolucionan más o menos rápidamente en la atmósfera, dependiendo sobre todo de su composición y tamaño. Las más pequeñas pueden difundirse y sufrir *evaporación*, contrariamente -por reacciones entre gases o presencia de vapores- puede predominar la *condensación* y formarse nuevas partículas (partículas secundarias) normalmente de tamaño inferior a 0,1 µm. En este caso suele distinguirse entre condensación *homogénea*, si tiene lugar en fase gaseosa, y *heterogénea*, cuando se produce sobre un núcleo sólido preexistente.

En la atmósfera las partículas pequeñas tienden a aumentar de tamaño, hasta que alcanzan la estabilidad entre 0,1 y 2 µm. Su crecimiento puede tener lugar por diversos mecanismos, entre los que cabe mencionar la *acumulación de gas* en su superficie y su posterior reacción entre ellos, y la *agregación por choques* y coagulación de partículas.

En las más pequeñas los choques son debidos al movimiento browniano, en las grandes pueden producirse por turbulencia atmosférica.

Su *eliminación* de la atmósfera también puede tener lugar por distintos mecanismos, dependiendo del tamaño de las partículas y las características de la atmósfera (viento y lluvia sobre todo). Como resultado se tienen dos tipos:

- *Depósito seco*, cuando predomina la sedimentación de las partículas por gravedad. Afecta sobre todo a las partículas más grandes y pueden arrastrar otras menores en su caída, con viento puede producirse depósito por choque con impacto.
- *Depósito húmedo*, cuando las partículas son barridas por la lluvia. Afecta sobre todo a los núcleos de condensación y, en menor medida, las partículas son arrastradas por las gotas de agua en su caída.

Composición

En cuanto a la naturaleza y composición de las partículas pueden considerarse distintos conceptos: estado de agregación (sólido o líquido), composición química elemental (Fe, Si, Ca...), tipo de compuesto químico (inorgánico, óxido, sal, orgánico...) y composición mineral (cuarzo, calcita...)

La composición de las partículas depende de las fuentes que las generan y también de las reacciones químicas que tienen lugar en la atmósfera. La proporción de elementos y compuestos en las partículas atmosféricas refleja la abundancia relativa de elementos en las fuentes del material, lo que permite identificar su origen.

En cuanto a la composición química elemental de las partículas inorgánicas -en relación con su abundancia relativa- puede distinguirse las siguientes clases:

- *Elementos mayores* (>1 mg/m³): O, Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, Cl, C. Los ocho primeros son los componentes mayoritarios de la corteza terrestre y, por tanto, su origen es natural cortical o continental. El Ca, Mg y Fe también pueden proceder de fuentes antrópicas. El Cl se considera de origen natural marino. El C es típicamente antropogénico, procede de la combustión.
- *Elementos menores*: Cu, Pb, Ti, Zn. El Ti es relativamente abundante en la corteza, por lo que se le atribuye origen natural cortical. El Cu, Pb y Zn se consideran antropogénicos.
- *Otros elementos*: Sb, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Ce, Li, Mn, Ni, Ru, Se, Sr, V, Ba, Br. Entre ellos al Cr, Ni y Se se les atribuye origen natural. El Be, Ba, Br, Cd y V se consideran antropogénicos.

Los principales tipos de compuestos químicos pueden agruparse en dos categorías:

- *Inorgánicos*, entre los que destacan: minerales terrígenos, óxidos metálicos, sales, compuestos de S y N, radionucléidos.
- *Orgánicos*, entre los que abundan: hidrocarburos alifáticos y aromáticos, ácidos orgánicos (fórmico, acético), formaldehidos, terpenos, polen, bacterias...

En cuanto a la relación entre la composición química de las partículas y la fuentes de la que procede, se tienen los siguientes datos:

- Las partículas de *origen cortical* (edáfico, terrígeno, volcánico) son arenas y polvo, de tamaño relativamente grande (>1 µm), ricas en compuestos insolubles: sílice, silicatos, óxidos metálicos, cal, carbonatos. Contienen Al, Si, Ca, (Ba, Fe, Mg, K, Na, Ti).

- Las partículas de *origen marino* son los aerosoles oceánicos, ricos en sales marinas (cloruros, nitratos). Contienen Cl, Na, S, Mg.
- Las partículas generadas por *procesos de combustión* forman cenizas volantes, hollines y humos, y están compuestas mayoritariamente ($\approx 50\%$) por C elemental y óxidos metálicos e hidrocarburos. Contienen Al, Ca, Fe, Si, (Mg, S, Ti, P, K, Na). En general, la concentración de elementos metálicos sufre gran incremento ($\times 1000$) respecto al combustible de partida, y la presencia de algunos elementos pueden relacionarse con el tipo de combustible: a) vegetal: K, Na y P (origen marino) o Ca, Mg, Si y P (de gramíneas), en ambos casos se forman cenizas volantes que son arrastradas por el humo; b) carbón: Ca, Fe, Al, Si y Hg, con partículas solubles poco abundantes y partículas insolubles (vidrio, óxidos), su contenido en cenizas es mayor; c) petróleo: V, Mg y S, con abundantes partículas solubles ($\approx 66\%$) donde los sulfatos mayoritarios y también hay partículas insolubles (carbón, óxidos); d) gas natural: es el combustible más limpio; e) residuos domésticos: Sb, Se, Cr, Cd, Pb; f) gasolina: Pb; g) gasoil: C, Hc.

Las partículas generadas por condensación de vapores están formadas por sulfatos, nitratos, amoníaco, compuestos orgánicos y partículas metálicas. Las partículas metálicas son de muy pequeño tamaño ($< 1 \mu\text{m}$), están formadas por óxidos de metales pesados: Pb, Ag, Hg, Be (metal ligero), Cd, Cu, Zn, Cr, V, Ni, As (metaloide), y por su tamaño y composición son las más peligrosas para la salud humana. Con frecuencia son de origen antrópico y guardan relación con la combustión de carbón o volcánico (Hg), de gasolina (Pb) o de petróleo (V), y también pueden ser de origen natural (Cr y Ni). Intervienen en el desarrollo del tiempo atmosférico, en la formación de nubes como núcleos de condensación, y en la absorción de la radiación solar. Su concentración en el agua de lluvia es un millón de veces mayor que en el aire.

Tamaño

Es otra característica de gran interés ya que variaciones en el tamaño de las partículas producen cambios en sus propiedades y en su comportamiento en la atmósfera. El tamaño influye en la facilidad con que son eliminadas de la atmósfera, en la extensión de las áreas contaminadas y en el efecto que producen en los materiales o en los organismos (en la facilidad de penetrar en sus vías respiratorias).

En función del tamaño las partículas pueden dividirse en:

- *Gruesas*: $> 10 \mu\text{m}$, constituyen la *materia sedimentable*: a) son más abundantes en la baja atmósfera ($< 3 \text{ Km}$), donde permanecen en suspensión cortos periodos de tiempo (1 o 2 días); b) importantes sobre todo en la proximidad de las fuentes; c) proceden de granos terrígenos, cenizas volantes, polvos industriales (molienda), esporas y granos de polen...; d) depositan por gravedad (en calma), o por impacto inercial si hay viento; e) generan fundamentalmente problemas de ensuciamiento.
- *Finas*: $< 10 \mu\text{m}$, constituyen la *materia en suspensión* (aerosoles, López, 1994): a) son mecánicamente estables en el aire, permaneciendo mayor tiempo en la baja atmósfera (tiempo de residencia: 2 días a 1 semana, según su tamaño); b) más abundantes en zonas alejadas de las fuentes de emisión, en dichas zonas las partículas inferiores a 1 mm representan el 80 % (Elson, 1990); c) formadas por metales, carbón, polen, sulfatos ($\approx 20\%$), cloruros...; d) pueden ser transportadas grandes distancias por el viento; e) se fijan sobre los materiales por cargas electrostáticas; f) generan problemas de salud ya que son inhalables. De acuerdo con su tamaño y propiedades se distinguen:

- *Partículas de 10 a 1 μm*, abundantes. Son fáciles de transportar, sufren decantación más o menos lenta y también son eliminadas de la atmósfera por la lluvia, niebla, viento (colisiones), su velocidad de asentamiento es significativa. Poco importantes en la reducción de la visibilidad. Proceden de cenizas volantes, polvo de la corteza, polvos industriales (molienda).
- *Partículas de 1 a 0,1 μm*, abundantes, núcleos de condensación de las nubes. Presentan movimiento browniano y sufren choques que producen coagulación y decantación, su velocidad de asentamiento es muy pequeña. Reducen la visibilidad (su tamaño es parecido al de la radiación visible, por lo que dispersan la luz). Proceden de humos industriales, de combustión, sal marina... Las inferiores a 0,5 μm son peligrosas para la salud.
- *Partículas inferiores a 0,1 μm*, núcleos de Aitken, el 50 % de las que penetran en los pulmones quedan retenidas. También muestran movimiento browniano, que favorece los procesos de coagulación y decantación. No reducen la visibilidad (dispersan la luz como las moléculas). Proceden de humos industriales, humos de combustión..., generadas por condensación de vapores, reacciones químicas asociadas a la combustión (son partículas secundarias). Son peligrosas para la salud.

Forma

Las partículas pueden tener forma: a) irregular angulosa, propia de partículas terrígenas (arena, limo); b) poliédrica cristalina, propia de sales solubles; c) esféricas a subesféricas, propia de partículas de combustión (humo, cenizas volantes), las cuales a su vez pueden ser macizas, con vesículas, con poros o esqueléticas; d) singulares o compuestas, propias de partículas orgánicas, con la superficie decorada por estructuras y simetrías.

BIBLIOGRAFÍA

- Lopez Bonillo D. (1994). *El medio ambiente*. Cátedra, Madrid, p: 117-177.
- Elsom D. (1990). *La contaminación atmosférica*. Cátedra, Madrid, p:15-168
- Sanz Sa (1991). *La contaminación atmosférica*. MOPT, Madrid, p: 5-102
- Liethe W. (1981). *La química y la protección del medio ambiente*. Paraninfo, Madrid, p: 14-82
- Climent Bellido M.S. (1996). *Aspectos químicos de la contaminación atmosférica*. Universidad de Córdoba, Córdoba, p: 9-77.
- Catalá de Alemany, J. (1986). *Contaminación y conservación del medio ambiente*. Alhambra, Madrid, p: 12-47.
- Manahan, S.E. (1993). *Environmental Chemistry*. Lewis Pub, London, p: 577-611.
- Domenech X. (1995, 2ª Ed). *Química atmosférica: origen y efectos de la contaminación*. Moraguano, p: 43-62.
- Harrison, R.M. (1992). *Understanding our environment: an introduction to environmental chemistry and pollution*. The Royal Society of Chemistry, London, p: 16-51.
- Wark K y Warner C.T. (1998). *Contaminación del aire: origen y control*. Limusa-Noriega, México, p:193-235.
- Winkler E.M. (1997, 3ª Ed.). *Stone in architecture. Properties. Durability*. Springer Verlag, Berlin, 313 p.