

METEOROLOGÍA Y CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA. PECULIARIDADES DE LA ZONA URBANA DE JAÉN

Antonio Hayas Barrú
Profesor titular en la Facultad
de Ciencias Experimentales
(Departamento de Física Aplicada)
Jaén

RESUMEN

Un estudio sobre la velocidad y la dirección del viento, así como sobre la estabilidad térmica vertical, ha sido realizado en la atmósfera de la zona urbana de Jaén (España). Estos parámetros meteorológicos tienen una influencia directa en la difusión de los contaminantes del aire, y su conocimiento nos permite interpretar la evolución diaria y anual de la concentración media de partículas en la atmósfera.

Los resultados obtenidos demuestran una clara relación entre las situaciones atmosféricas y la concentración de contaminantes en cada instante, por lo que el conocimiento del microclima de una determinada zona es de gran interés para la prevención de la contaminación.

SUMMARY

The wind speed and direction, and the vertical thermic stability have been studied in the atmosphere of the urban area of Jaén (Spain). These meteorological

parameters have a direct influence on the diffusion of the air pollution. Its knowledge have enabled us to interpret the diurnal and annual evolution of the average particulate concentration.

The results show a clear relationship between the atmospheric situation and the pollution concentration in every time. In this way, to know the microclimate of an area is very important to provide the pollution effects.

INTRODUCCIÓN

Desde un tiempo a esta parte, la preocupación por la calidad del medio ambiente ha trascendido los medios puramente científicos para interesar a la opinión pública en general, sensibilizada ante algunos graves problemas de contaminación que se han presentado y se siguen gestando en muchas ciudades de todo el mundo. Este interés va encaminado a la consecución de un medio mejor para el desenvolvimiento de la vida, compatible con el necesario desarrollo de la misma.

La contaminación ambiental interesa a gentes de las profesiones más diversas, tales como físicos, biólogos, químicos, ingenieros, médicos, etc., lo que nos demuestra la multitud de facetas que presenta el problema y, por lo tanto, su complejidad.

Según sea el sistema objeto de estudio, se habla de contaminación del suelo, del agua o de la atmósfera. Centrándonos en la polución atmosférica, el objetivo de esta monografía es resaltar la estrecha relación que existe entre el microclima de una zona y su capacidad potencial para eliminar los contaminantes atmosféricos.

La atmósfera es un sistema dinámico cuya fuente fundamental de energía es el Sol y, por lo tanto, causa primaria de la mayoría de los procesos que tienen lugar en el planeta (desde la circulación general atmosférica hasta la propia vida). La energía recibida es aproximadamente de $3,7 \times 10^{21}$ calorías/día. Esta energía llega en forma de radiación electromagnética, abarcando todo el espectro que va desde los rayos gamma (pasando por los rayos X, ultravioleta, visible, infrarrojo, microondas) hasta las radiofrecuencias. Una gran parte de esta radiación, que sería muy perjudicial para los seres vivos, es absorbida por la atmósfera, que actúa como escudo protector contra esas radiaciones.

El aire de las capas bajas de la atmósfera está formado por una mezcla uniforme de nitrógeno, oxígeno, argón y dióxido de carbono, en unas proporciones

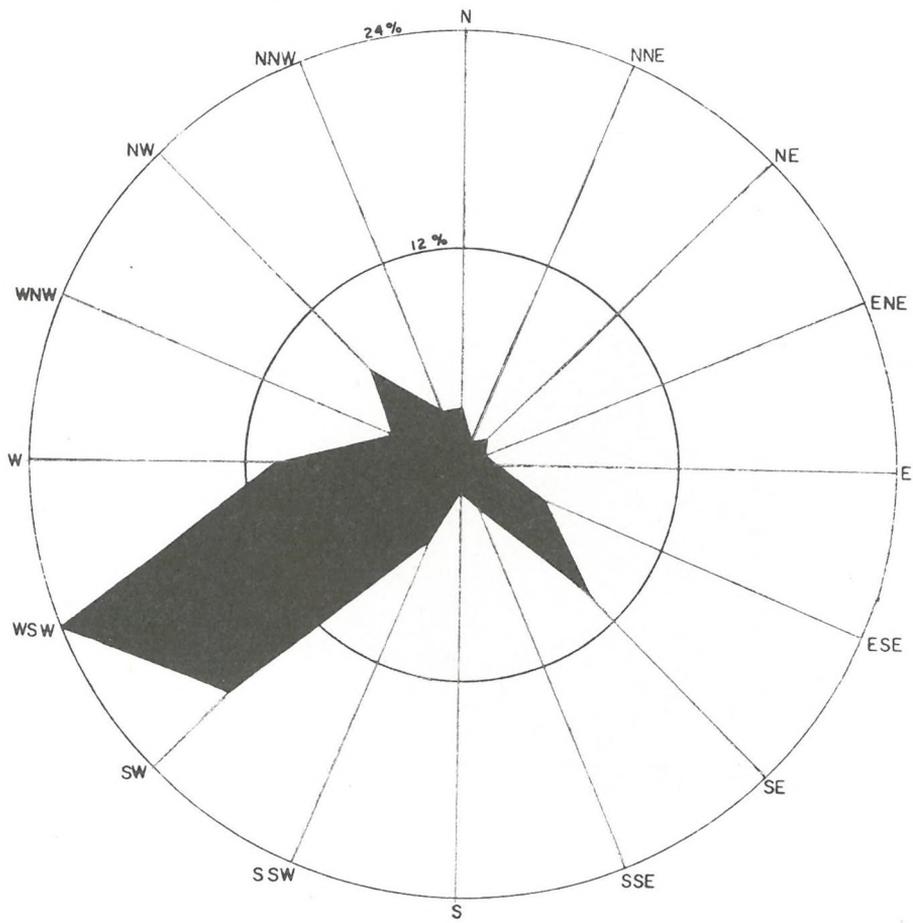


Fig. 1

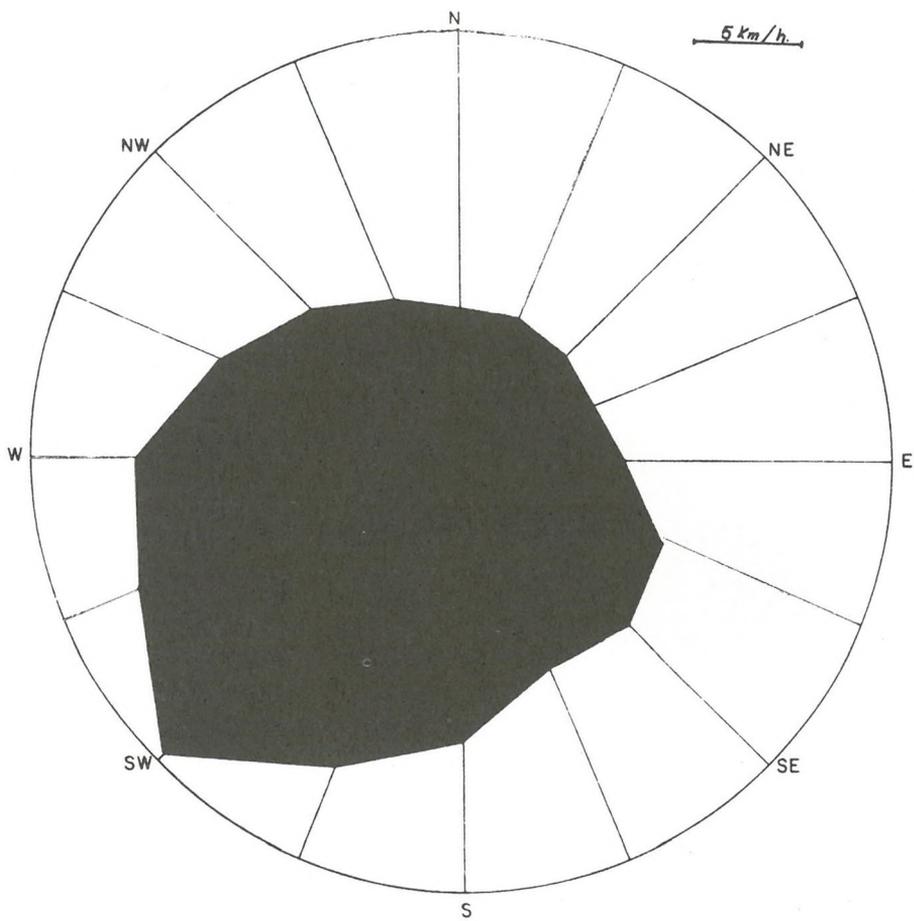


Fig. 2.

de 78,9 %; 20,9 %; 0,9 % y 0,03 %, respectivamente, así como cantidades muy pequeñas de monóxido de carbono, hidrógeno, metano y otros gases. Aunque la densidad del aire disminuye rápidamente con la altura, esos porcentajes se mantienen prácticamente constantes hasta una altura de 85 km. aproximadamente.

La atmósfera se puede dividir en capas muy diversas según se consideren sus propiedades físicas o químicas. La zona de mezcla homogénea que ocupa los primeros 85 km. se divide, desde un punto de vista térmico, en varias regiones. La primera es la troposfera que se extiende desde la superficie terrestre hasta una altura media de unos 11 km.; en esta delgada capa de aire tiene lugar la mayor parte de los fenómenos meteorológicos y se localiza el 80 % de la masa de toda la atmósfera. Esta región es la más afectada por la contaminación del aire y en ella se encuentra la mayor parte del vapor de agua contenido en la atmósfera. Su temperatura disminuye con la altura a razón de 0,68 °C cada 100 m. por término medio.

La región inmediatamente superior se extiende hasta una altura aproximada de 50 km. y recibe el nombre de estratosfera; en ella la temperatura, en vez de disminuir, aumenta con la altura, existiendo, por lo tanto, una inversión térmica que impide los movimientos verticales del aire. Este aumento de la temperatura es una consecuencia de la formación de ozono a partir del oxígeno atmosférico, mediante un proceso fotoquímico que libera energía en forma de calor.

Finalmente, y según esta división, se contempla la existencia de dos regiones más conocidas con los nombres de mesosfera y termosfera; la primera se extiende hasta una altura de 85 km. y la segunda hasta los límites de la atmósfera.

Desde el punto de vista de la contaminación atmosférica, la capa más interesante es la troposfera, ya que, como se ha mencionado anteriormente, es la región más afectada por la actividad del hombre.

Si se admite que para eliminar las impurezas de la atmósfera lo esencial es regular sus emisiones, el problema práctico que se plantea queda reducido a saber cuál será el coste de una reducción de los agentes contaminantes en un grado que pueda considerarse como satisfactorio. Dada una fuente de intensidad fija, este grado de reducción depende ciertamente de las condiciones meteorológicas de la zona y de sus variaciones en el espacio y en el tiempo. Por esta razón, a continuación abordaremos el estudio de aquellos parámetros atmosféricos fundamentales en el transporte de contaminantes.

FACTORES METEOROLÓGICOS

Son muchos los autores (1-4) que han demostrado la estrecha relación existente entre las situaciones meteorológicas y los niveles de contaminación alcanzados en un momento dado. Estas situaciones atmosféricas vienen determinadas por los valores que toman ciertas variables, tales como la presión, la temperatura, la humedad, etc. No obstante, desde el punto de vista de la contaminación, existen tres factores meteorológicos que influyen directamente en los niveles de contaminación y que son el viento, la estabilidad térmica vertical y la precipitación.

El estudio de estos factores en una determinada zona es de gran utilidad, ya que permite conocer su capacidad potencial para la dispersión y eliminación de los contaminantes. En este trabajo analizamos el viento y la estabilidad térmica vertical de la zona urbana de Jaén, como prototipo de ciudad poco industrializada y población media.

Los datos meteorológicos utilizados han sido tomados del Observatorio Meteorológico de Jaén, situado en el Instituto de Bachillerato «Virgen del Carmen», estación de primer orden del Servicio Meteorológico Nacional.

Los flujos de aire tienen su origen en gradientes de presión y temperatura. Ahora bien, cuando un meteorólogo habla de viento se refiere sólo al movimiento del aire en sentido «horizontal», o sea el dato que es capaz de suministrar un anemómetro. Por el contrario, al flujo de aire en sentido vertical se le conoce como flujo convectivo, y su existencia o no está íntimamente relacionada con la estratificación térmica vertical de la atmósfera.

En lo que al viento se refiere, los datos han sido obtenidos a partir de las bandas de registro del anemocinómetro instalado en el observatorio anteriormente citado. Del análisis de estos registros hemos podido calcular la dirección dominante y la velocidad media del viento durante cada hora, a lo largo de dos años de estudio. Se han obtenido así 24 datos de dirección y otros tantos del módulo de la velocidad para cada día. Con el propósito de ver qué direcciones son las que predominan en nuestra zona, se ha construido una rosa de los vientos con 16

(1) FACY, L.: «Intervention des facteurs météorologiques dans pollution atmosphérique». *Revue de l'Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique*, 2, 1959, pág. 41.

(2) NEWALL, H. E. y EAVES, A.: «The effect of wind speed and rainfall on the concentration of sulphur dioxide in the atmosphere». *Air and Water Pollution*, mai, août, 1962, pág. 173.

(3) DÉTRIE, J. P.: *La Pollution Atmosphérique*. Dunod, Editeur. París, 1969.

(4) ARTHUR STERN, C.: *Air Pollutants, their transformation and transport*. Academic Press, New York, 1976.

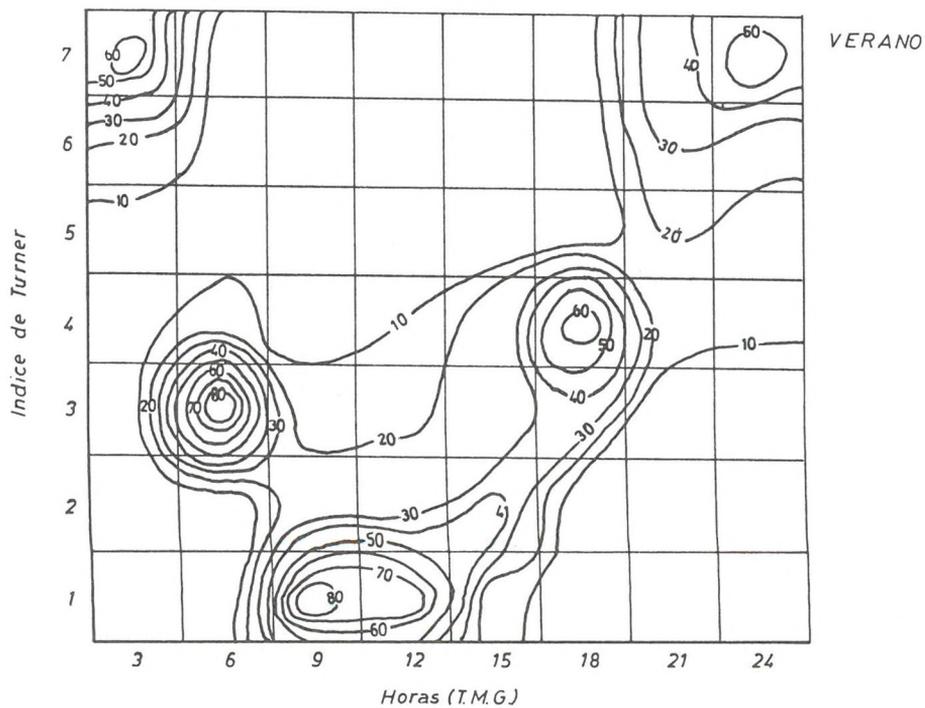
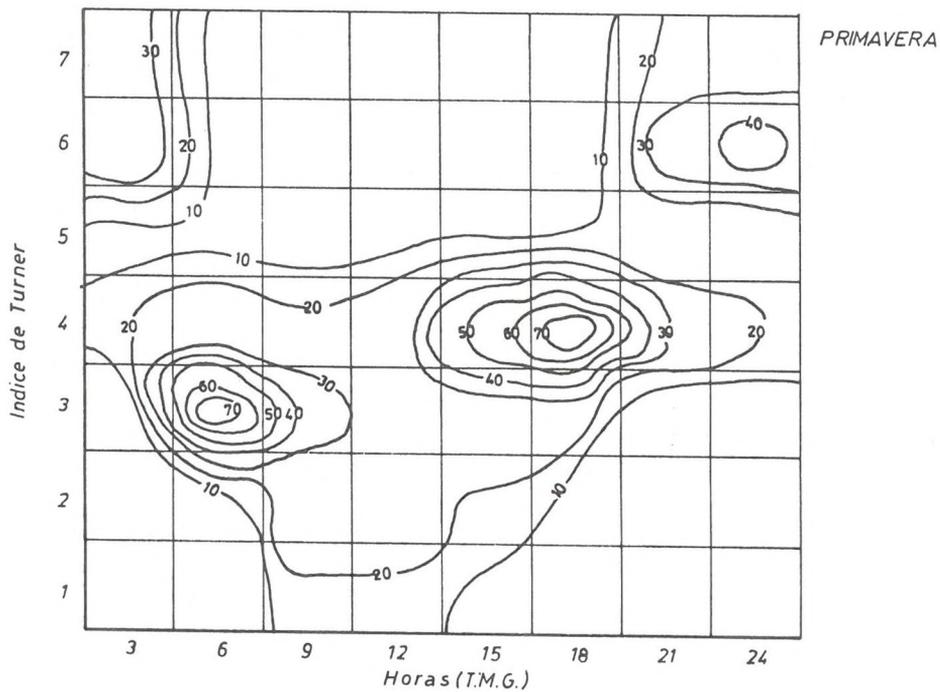


Fig. 3

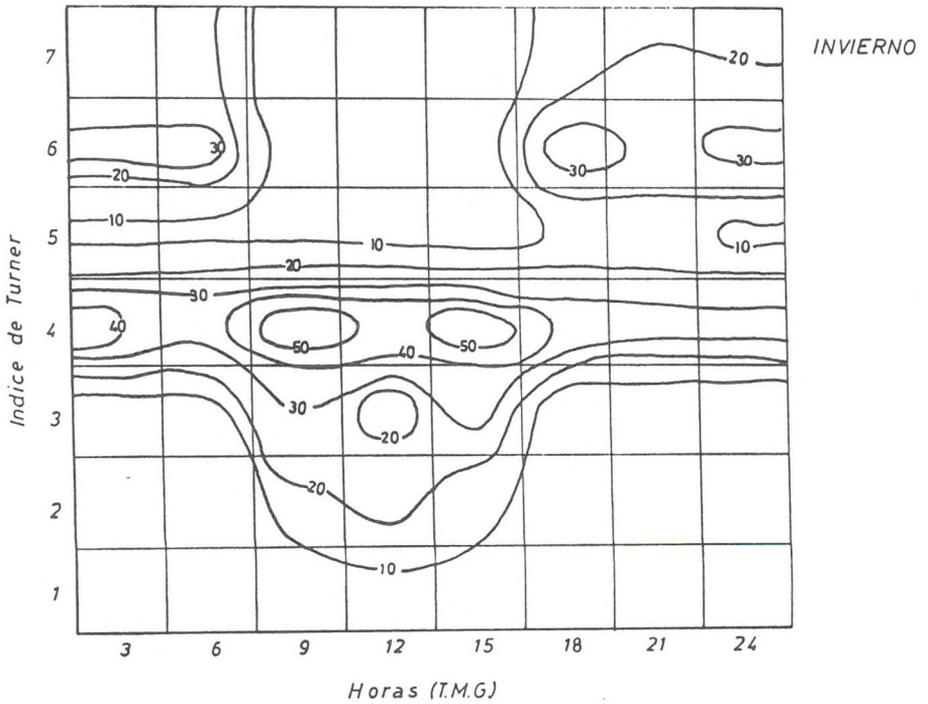
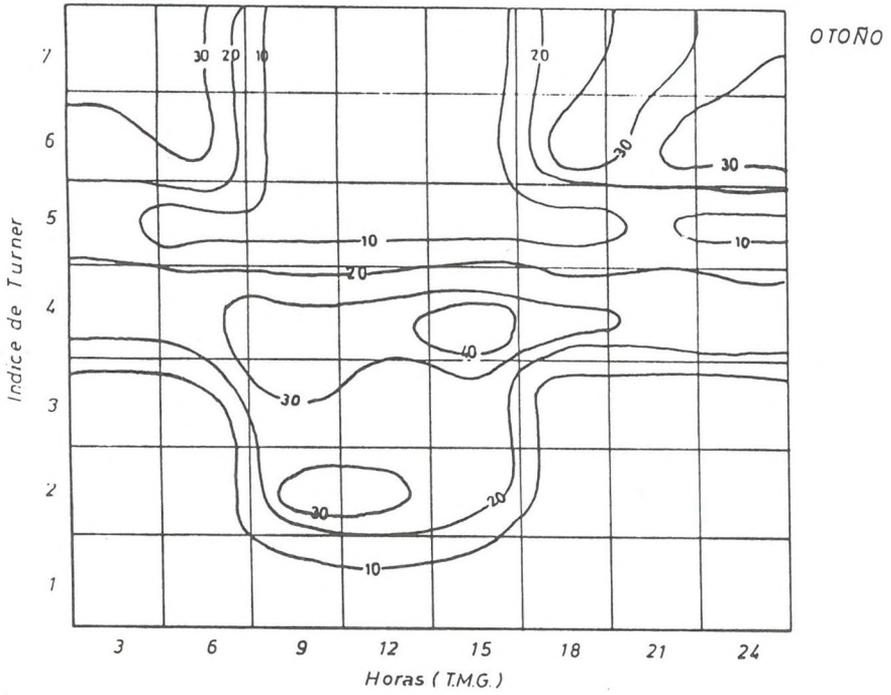


Fig. 4

direcciones y sobre sus radios se ha llevado, en tantos por ciento, las veces que se ha presentado cada dirección durante los dos años. La figura 1 muestra los resultados obtenidos. En ella se puede apreciar: 1) que las direcciones más frecuentes son SW y WSW, siendo esta última la de mayor frecuencia. Este resultado se justifica teniendo en cuenta que tanto el anticiclón de las Azores como la mayoría de las perturbaciones atlánticas producen, por lo general, vientos del oeste, que al ser canalizados por la depresión del Guadalquivir toman los rumbos comprendidos entre aquellas direcciones. 2) Las direcciones de menor frecuencia se encuentran comprendidas entre el norte y el este, ya que las situaciones meteorológicas (anticiclón al oeste o norte de la Península con una depresión sobre el Mediterráneo) que dan lugar a vientos comprendidos entre esos rumbos son muy escasas.

La intensidad media del viento según las distintas direcciones se muestra en la figura 2, observándose que, en general, las direcciones más frecuentes son las que presentan vientos de mayor intensidad y viceversa. Considerando como calmas aquellas situaciones para las cuales la velocidad media del viento es inferior a 5 km/h, se ha observado que la frecuencia del viento en la zona investigada, o sea, días en los que se ha registrado viento, oscila entre el 55 % y el 60 % según las épocas del año.

Un estudio tan sencillo como el que se acaba de exponer es de enorme utilidad desde el punto de vista de la prevención de la contaminación, al permitir establecer las zonas óptimas para la ubicación de industrias contaminantes. Así, en nuestro caso, estas zonas están comprendidas entre el E y el NNE de la ciudad.

El otro factor meteorológico es la estabilidad térmica vertical. Es conocido que cuando una determinada masa de aire se eleva por cualquier causa sufre un enfriamiento por una expansión adiabática de su volumen. Por razonamientos termodinámicos se demuestra que este enfriamiento es aproximadamente del orden de 1 °C por cada 100 m. Por otra parte, se llama curva de estado del aire al perfil térmico obtenido mediante un radiosondeo, que consiste en un dispositivo que registra la temperatura de la atmósfera a distintas alturas. Comparando esta curva de estado con el gradiente adiabático (=1 °C/100 m.) se puede saber el tipo de estratificación que posee la atmósfera y, por lo tanto, si existen o no flujos convectivos que posibilitan la dispersión vertical de cualquier contaminante.

Si la temperatura en las capas bajas de la atmósfera disminuye con la altura en una cantidad superior a 1 °C por cada 100 m., diremos que la atmósfera es inestable, ya que se favorecen los movimientos verticales. En caso contrario, diremos que la atmósfera es estable y, por lo tanto, la ventilación vertical no estará facilitada.

En general, la temperatura disminuye con la altura en la troposfera. No obstante, en algunas ocasiones se producen inversiones térmicas en las capas de aire que se encuentran junto al suelo. Este tipo de situación implica que la temperatura aumenta con la altura, en vez de disminuir, impidiendo cualquier tipo de movimiento vertical.

Al no disponer de perfiles térmicos por ausencia de radiosondeos en la zona objeto de este trabajo, el estudio de la estabilidad térmica de la misma se ha realizado por un método indirecto propuesto por Turner (5) y que ha sido utilizado con éxito por diversos investigadores (6, 7). El método está basado en una estimulación de la estabilidad cerca del suelo, partiendo de datos de radiación solar, nubosidad y velocidad del viento, datos que sí podían ser suministrados por nuestra estación meteorológica. Turner, con estos datos, establece una serie de índices que va desde 1, que significa extrema inestabilidad, hasta 7, que significa extrema estabilidad. El índice 2 significa inestabilidad; el 3, moderada inestabilidad; el 4, atmósfera indiferente; el 5, ligeramente estable, y el 6 estable.

La aplicación del método conduce a resultados aproximados que, aunque impiden llegar a conclusiones precisas, permiten comentar aspectos generales de la estabilidad térmica en la zona objeto de nuestro estudio.

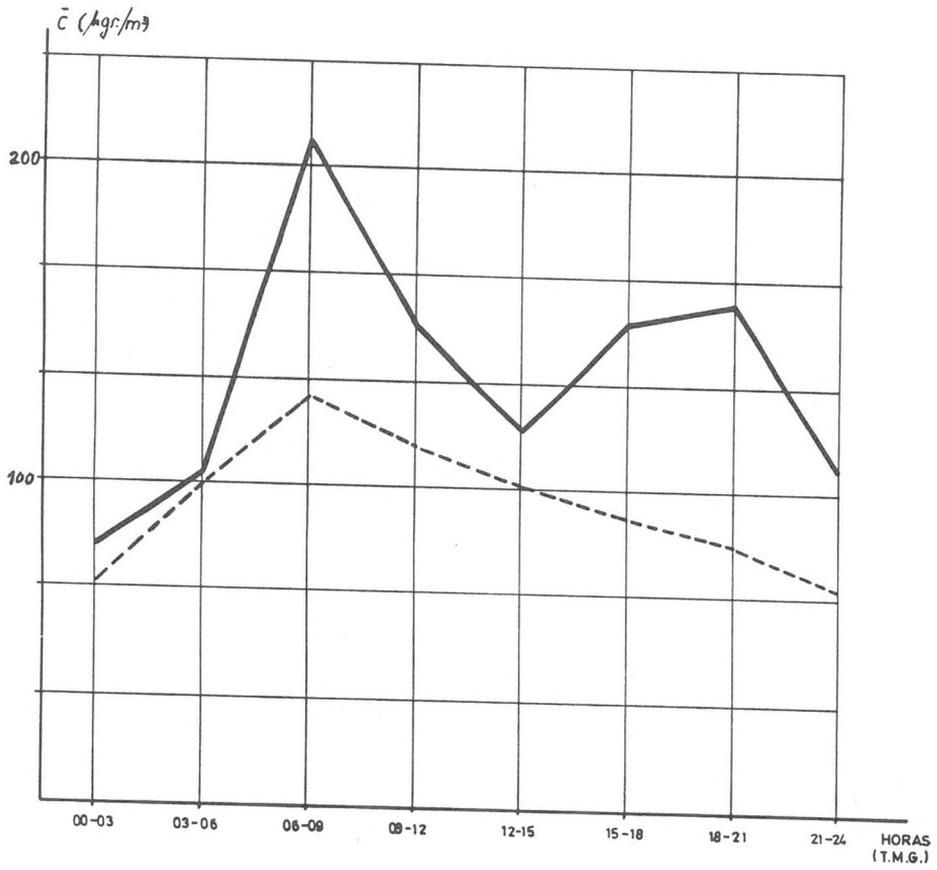
Las figuras 3 y 4 muestran los resultados obtenidos para cada una de las estaciones del año. En ellas, como dato más relevante, puede observarse que, durante las horas de insolación, se producen situaciones de inestabilidad con relativa frecuencia en primavera y verano con el máximo en esta última estación, mientras que en otoño e invierno estas situaciones son relativamente poco frecuentes. Por el contrario, durante la noche predominan las situaciones de estabilidad como consecuencia del enfriamiento que sufre la tierra.

Estos resultados nos van a permitir justificar la evolución que experimenta la contaminación atmosférica, comprobando así la estrecha relación que existe entre situación meteorológica y concentración de contaminantes en un momento dado.

(5) TURNER, D. B.: «A diffusion model for an urban area». *J. Appl. Met.*, 3, 1964, págs. 85-91.

(6) LLANO, R. del: *Sobre ciertos fenómenos de mesoescala en una atmósfera urbana*. Centro de Investigación UAM-IBM, PCI-04.74, 1974.

(7) NAVARRO, E.: «Estudio de la Contaminación atmosférica en Valencia». Tesis Doctoral. Universidad de Valencia, 1974.



— Periodo I
 - - - Periodo II

Fig. 5

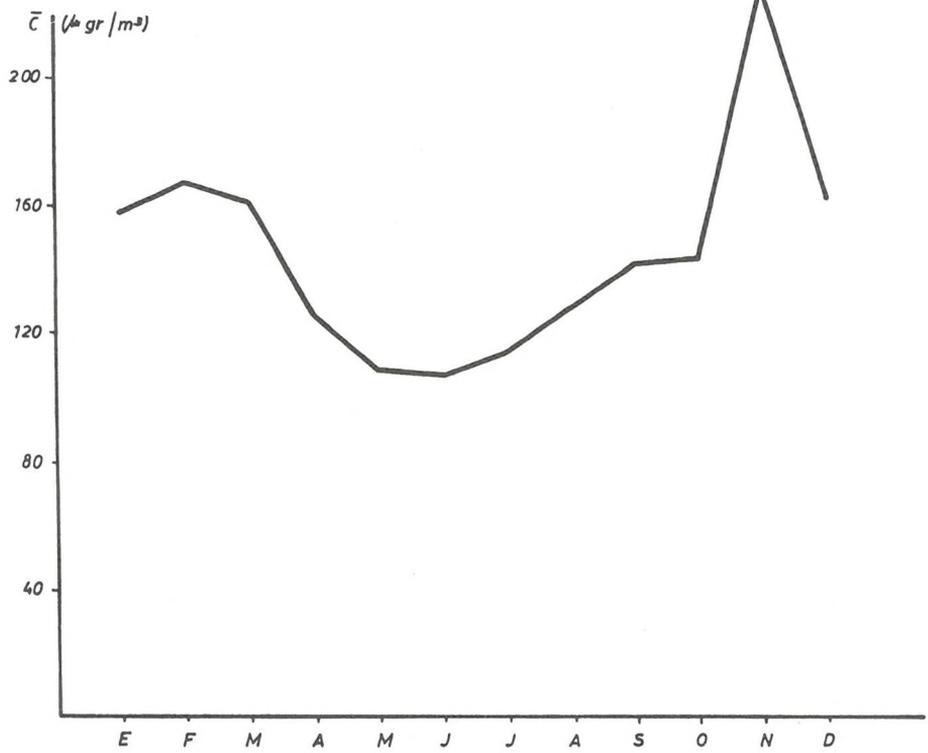


Fig. 6

CONTAMINACIÓN POR PARTÍCULAS

Sabemos que las sustancias que contaminan la atmósfera de las zonas urbanas proceden fundamentalmente de los productos de combustión que, en cantidades cada vez mayores, son liberados por el consumo de combustibles para la calefacción doméstica e industrial, la producción de energía, el transporte y otras aplicaciones. Los cinco contaminantes principales del aire son los óxidos de azufre (SO_x), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono CO, diferentes tipos de hidrocarburos y partículas.

En este estudio vamos a centrarnos en la contaminación por partículas, también conocidas bajo el nombre de aerosoles.

Las partículas atmosféricas constituyen uno de los contaminantes más importantes, ya que interfieren la radiación solar, con frecuencia actúan como núcleos de condensación influyendo en las precipitaciones, y sirven además como catalizadores de diferentes reacciones químicas entre contaminantes atmosféricos. Según su composición química, existen partículas que tienen efectos tóxicos de largo alcance; en cualquier caso, cuando su concentración sobrepasa ciertos límites, las partículas pueden producir irritación persistente en los tejidos pulmonares, contribuyendo a la aparición de enfermedades de las vías respiratorias o a su agravamiento.

Las partículas se suelen clasificar a menudo por su tamaño, tomándose como un índice del mismo el diámetro del círculo con igual área que la proyección de la partícula vista con microscopio. La tabla 1 muestra esta clasificación. Como puede observarse en la misma, aquellas partículas cuyo diámetro es superior a $10 \mu\text{m}$. se separan del aire con bastante rapidez por sedimentación. Las partículas cuyo tamaño oscila entre $0,1$ y $10 \mu\text{m}$, aproximadamente, forman en el aire suspensiones

TABLA 1

Diámetro de la partícula (μm)	Velocidad de sedimentación (cm/s)
200	120
100	30
50	7
10	0,3
5	0,07
1	0,003
0,5	0,0007

mecánicamente estables y aquéllas cuyo diámetro es inferior a $0,1 \mu\text{m}$. poseen movimiento browniano, y pueden esparcirse en la atmósfera casi con la misma facilidad que los gases.

Así pues, los movimientos de las partículas en el aire en calma se deben a dos fenómenos principales: sedimentación por gravedad y difusión por efecto browniano. La importancia relativa de ambos efectos depende de la razón del tamaño de la partícula (ver tabla 1) al recorrido libre medio de las moléculas del aire, que es casi $0,07 \mu\text{m}$. a nivel del mar. Muchas partículas, sobre todo las de menos de una micra de diámetro, se eliminan cuando quedan adheridas al chocar con superficies de sólidos, líquidos o contra partículas mayores, así como por asociación en cúmulos más grandes. La lluvia tiene una gran importancia en la eliminación de partículas superiores a 2 micras, y las que son de menor tamaño tienden a seguir el flujo del aire en torno a las gotas de lluvia, o bien servir como núcleos de condensación para formar nubes o nieblas, siendo eliminadas al producirse la precipitación.

La tabla 2 muestra la cantidad de partículas vertidas a la atmósfera según su procedencia (natural o producida por el hombre). Las cifras están dadas en millones de toneladas al año. En ella puede apreciarse que la cantidad de partículas con un origen natural es muy superior a la producida por el hombre, pero mientras las fuentes naturales suelen ser muy extensas, la contaminación producida por el hombre suele estar muy localizada.

TABLA 2

Fuente	Natural	Producida por el hombre
Cenizas por el carbón	—	36
Industrias hierro y acero	—	9
Combustibles fósiles	—	8
Combustión del petróleo	—	2
Incineración	—	4
Actividad agrícola	—	10
Industria del cemento	—	10
Diversas	—	16
Agua de mar	1.000	—
Polvo del suelo	200	—
Partículas volcánicas	4	—
Incendios forestales	3	—
Totales	1.204	95

Mediante dispositivos adecuados (8) se han medido las concentraciones de partículas en la zona urbana de Jaén durante dos años. La figura 5 muestra la evolución diaria de la concentración media de partículas en los períodos de fuertes emisiones o período I (meses de otoño e invierno) y débiles emisiones o período II (meses de primavera y verano). En ella se observa un máximo matinal entre las 6 y las 9 h (TMG) para ambos períodos, siendo mucho más acusado en el período de fuertes emisiones, como era de esperar. También se observa un mínimo absoluto de concentración entre las 0 y 3 h para ambos períodos. Por último y sólo en el período de fuertes emisiones, aparecen un mínimo relativo entre las 12 y las 15 h y un máximo relativo entre las 18 y las 21 h.

Los resultados obtenidos se justifican en base a las diferentes condiciones atmosféricas y de emisión de contaminantes existentes en las distintas estaciones del año. En efecto, durante el otoño y el invierno, aumenta las emisiones como consecuencia del funcionamiento de las calefacciones y, por otra parte, la atmósfera se comporta como una masa cálida que al discurrir sobre un suelo frío favorece la formación de situaciones de gran estabilidad, que entorpecen los movimientos verticales. Por el contrario, en primavera y verano, además de ser menores las emisiones, la atmósfera se comporta como masa fría que al discurrir sobre un suelo calentado se favorecen las situaciones de inestabilidad y, por lo tanto, la ventilación vertical.

El máximo que se observa entre las 6 y las 9 h es una consecuencia de la inversión térmica que se produce durante la noche por el enfriamiento de las capas bajas de la atmósfera, circunstancia esta que quedaba perfectamente reflejada en los gráficos que sobre los índices de estabilidad hemos visto anteriormente (figuras 3 y 4). Así, los contaminantes retenidos en la zona de inversión tienen una difusión vertical prácticamente nula. Desde el momento de la salida del Sol, el calentamiento del suelo produce una destrucción progresiva de la inversión nocturna que, a su vez, provoca un fenómeno conocido como fumigación y que consiste en que los contaminantes acumulados en las capas inmediatas a las que están junto al suelo, descienden con rapidez hacia la tierra por turbulencia convectiva, dando lugar a ese máximo de concentración a primeras horas de la mañana. A esta situación atmosférica desfavorable a la dispersión de los contaminantes hay que añadir el aumento de las emisiones a esas horas del día por el comienzo de la actividad ciudadana.

Por otra parte, mientras que el máximo que se observa a últimas horas de la tarde es una consecuencia de la estabilización que sufren las capas bajas de la

(8) HAYAS, A.: «Meteorología del desarrollo de Jaén: contaminación por partículas». Tesis Doctoral. Universidad de Granada, 1979.

atmósfera por enfriamiento, los mínimos absoluto y relativo de contaminación tienen una explicación opuesta, ya que el primero es una consecuencia de la sensible disminución de las emisiones, mientras que el segundo se debe a un máximo en la capacidad de la atmósfera para la difusión de las mismas.

La evolución de las concentraciones medias mensuales se muestra en la figura 6. En ella puede observarse claramente cómo la concentración media de partículas atmosféricas es mayor en los meses de otoño e invierno que en los de primavera y verano, como consecuencia de las diferencias entre intensidad de las emisiones y situaciones atmosféricas a lo largo del año y comentadas anteriormente. Estudios realizados en Madrid (9) sobre el fenómeno de la persistencia de la inversión térmica nocturna, durante los últimos 20 años, han demostrado que el máximo de estas situaciones se da en los meses de noviembre y diciembre. En definitiva, admitiendo un nivel prácticamente constante en la emisión de contaminantes durante los meses de otoño e invierno, las condiciones meteorológicas adversas son las que determinan los máximos de contaminación. Así, por ejemplo, en la zona urbana de Jaén se han registrado concentraciones de partículas superiores a los $600 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ durante el período de fuertes emisiones que, aunque siempre fueron sucesos aislados, coincidieron con situaciones prolongadas de estabilidad atmosférica.

Como conclusión se puede decir que aunque la meteorología no basta por sí sola para reducir en general los riesgos de polución, sí debe ser parte integrante de cualquier programa para resolver un problema de esta clase, ya sea en una fábrica o en una zona industrial. Una estación meteorológica debidamente situada en la que se midan los vientos, la radiación solar, los gradientes de temperatura, etc., permitirá conocer las características microclimatológicas de la zona y, por lo tanto, su capacidad potencial para la dispersión y eliminación de los contaminantes, así como los lugares idóneos para la ubicación de futuras instalaciones industriales en prevención de sus efectos nocivos sobre la población.

(9) SOLER, A. M.: «Situaciones meteorológicas locales típicas: su persistencia y parámetros más característicos». Tesis Doctoral. Universidad Complutense, Facultad de Físicas. Madrid, 1977.