

La estabilidad atmosférica como factor de contaminación del aire: otoño de 1985 en Barcelona

por PEDRO L. CLAVERO*

Palabras clave:

anticiclón; Barcelona; contaminación del aire; correlación; estabilidad atmosférica; humos; inversión térmica; regresión; SO₂.

La contaminación del aire sobre las grandes áreas urbanas e industriales puede definirse como un "peligro natural", perteneciente al grupo de los físicos y dentro de éstos al subgrupo de los meteorológicos, en la medida en que consiste en un proceso que se desarrolla en la atmósfera, genera una situación de riesgo y puede originar de forma episódica daños importantes en los seres vivos y de forma permanente en los edificios, monumentos, etc. Ahora bien, al analizar las causas que desencadenan el proceso se desprende que debemos clasificarlos dentro de los "peligros antrópicos" y del subtipo "tecnológicos" (basado en la clasificación de Ayala, 1990), porque el impacto ambiental se produce como consecuencia de actividades del hombre en posesión de una tecnología que origina, con sus ingentes combustiones, manufacturas y manipulaciones, gran cantidad de sustancias sólidas, líquidas y gaseosas que son vertidas a la atmósfera. Por tanto, el fenómeno es de una gran complejidad. En efecto, es evidente que las condiciones atmosféricas sobre un lugar no crean la contaminación del aire, pero determinan unas situaciones en que la máquina atmosférica local está como paralizada, incapaz de generar movimientos ascendentes ni advectivos importantes. Así las sustancias contaminantes, vertidas a la atmósfera por las distintas fuentes de emisión, se acumulan en la parte inferior de la capa límite troposférica, originando unos niveles de inmisión muy superiores a los indicadores de fondo correspondientes a la región. En el desarrollo del proceso intervienen muchos factores, son muy numerosos los distintos contaminantes primarios y todavía poco conocidas las variadas combinaciones de los contaminantes entre sí y con los componentes del aire puro, que, finalmente, con la acción de la energía solar generan los contaminantes secundarios. Por esta complejidad es obvio que la relación entre la situación atmosférica, si ésta fuera posible captar en su totalidad, y menos la de alguno de sus aspectos parciales, no es funcional, sino que la relación de dependencia se establece

*Profesor titular del Departamento de Geografía física y Análisis geográfico regional de la Universidad de Barcelona.

mediante correlación estadística, en la que las condiciones atmosféricas y, por extensión, el clima, aparece como variable independiente o explicativa, mientras que la contaminación del aire es la variable dependiente o explicada.

Este planteamiento puede sorprender a algún lector más acostumbrado a la persistencia con que los diversos medios de comunicación tratan sobre el tan manido "cambio climático actual, producido por el efecto invernadero de los gases procedentes de las combustiones antropogénicas". Para la comunidad científica tal cambio no pasa de ser una hipótesis no contrastable todavía y sobre cual no sólo no hay unanimidad, sino conclusiones enfrentadas, favorables al calentamiento unos, al enfriamiento otros. De lo que no hay duda es del papel primordial que desempeñan las condiciones atmosféricas en la acumulación de sustancias contaminantes (sólidas, líquidas o gaseosas) que modifican la estructura del aire sobre la capa toposférica superficial de las áreas urbanas e industriales. Y es evidente que "al hombre no le es posible alterar sustancialmente y voluntariamente las condiciones meteorológicas" (Puigcerver, 1979). Por tanto, para el conocimiento del mecanismo de acumulación de contaminantes, supuesto un ritmo regular en la emisión o vertido en la atmósfera (según un régimen impuesto por la actividad humana, determinada por fines de semana, períodos vacacionales, mayor necesidad energética en el período invernal, etc.), el factor discriminador es, sin duda, el estado de la atmósfera, pues ésta no es inerte, en ella se producen movimientos a diversas escalas y con grandes intercambios energéticos, tanto en advecciones meridanas, como en movimientos convectivos, y las sustancias contaminantes se ven afectadas por estas corrientes de variadas trayectorias en las tres dimensiones espaciales.

LA ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA, PRINCIPAL FACTOR METEOROLÓGICO DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

La energía solar es el motivo o causa primera que, actuando sobre una superficie terrestre diferenciada y en movimiento, determina la dinámica de la máquina atmosférica que, a su vez, origina las diversas situaciones meteorológicas, con peculiar comportamiento respecto al transporte y deposición de los contaminantes. Pero, sin duda, los dos factores meteorológicos claves para explicar el proceso de acumulación de sustancias contaminantes, que constituyen el fenómeno que llamamos contaminación atmosférica, son la estabilidad atmosférica y los vientos.

Los vientos realizan una labor de barrido horizontal de los contaminantes, tendiendo a alejarlos de la fuente de emisión; ahora bien, las sustancias contaminantes quedan atrapadas, fundamentalmente, en una estrecha película en la parte superficial de la capa límite (los primeros 500 m, aproximadamente, constituyen la capa límite planetaria y la mayor parte de contaminantes se sitúan en la capa más superficial, hasta unos 50-100 m). La capa superficial se caracteriza por flujos de calor constante procedentes de la superficie y fuerzas de rozamiento muy importantes, en relación con la rugosidad superficial, que determinan junto con el gradiente térmico el comportamiento del viento. En el resto de la capa límite para la caracterización del viento ya intervienen la fuerza de coriolis, y por encima de la capa límite circulan los vientos geostrofcos. Es decir, el viento sufre unas fuertes modificaciones en apenas unos pocos centenares de metros de espesor atmosférico, de forma que en la capa de aire en contacto con el suelo la turbulencia existente, por la compleja morfología urbana, dificulta enormemente la búsqueda de correlación significativa entre las observaciones eólicas convencionales y los niveles de inmisión de contaminantes. Así lo constatamos en un trabajo anterior en que la correlación no era significativa (Clavero, 1984).

Por ello nos centraremos en el análisis de la estabilidad atmosférica, en su incidencia sobre la acumulación de contaminantes en la capa superficial del aire urbano barcelonés,

como principal factor meteorológico de la contaminación. Es bien conocido que la troposfera se caracteriza por un comportamiento definido por el descenso térmico con el incremento de altura según el llamado gradiente adiabático, $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, aproximadamente, para el aire seco, que se explica por la expansión del aire al ascender y la consiguiente disminución de la energía interna del gas. Al aumentar el contenido en vapor de agua el gradiente va disminuyendo hasta ser próximo a $0,5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ en el aire saturado. Podría parecer que la estructura térmica de la baja troposfera debería ser tal que el perfil térmico estuviera siempre entre los dos gradientes citados, pero no ocurre así; los desplazamientos de masas de aire con valores térmicos e higrométricos contrastados, por un lado, y el calentamiento y enfriamiento de la superficie terrestre, según ritmos estacionales y diarios, explican que el comportamiento de la baja troposfera sea raramente adiabático. En efecto, estos procesos tienen una mayor magnitud, se superponen y modifican el gradiente adiabático vertical, que determina en gran medida los movimientos verticales del aire en la capa superficial. Si el perfil térmico corresponde al gradiente adiabático una burbuja de aire desplazada verticalmente estará en equilibrio con el aire circundante, se producirá estabilidad neutra o indiferente. Sin embargo, a causa del enfriamiento o calentamiento superficial y a la existencia episódica de masas de aire muy caliente o muy frío en los niveles troposféricos medios y altos, la troposfera presenta perfiles térmicos muy diferentes del adiabático. Si el gradiente es superadiabático el aire al ascender se enfría más lentamente que el circundante y continúa ascendiendo, la atmósfera es inestable y predominan las fuerzas ascendentes. Por el contrario, si el perfil es producido por un gradiente subadiabático puede llegar a crear una capa isoterma e incluso a presentar una *inversión térmica* (es decir, las temperaturas durante un cierto espesor atmosférico aumentan con la altura), la atmósfera es estable y los movimientos ascendentes se ven obstaculizados y, en consecuencia, la difusión vertical de los contaminantes es muy pequeña.

Las inversiones térmicas en la capa límite planetaria son el resultado de un enfriamiento superficial nocturno, sobre todo en el período invernal, de un calentamiento desde arriba por subsidencia anticiclónica y, muy frecuentemente, de ambos procesos. También se producen inversiones térmicas vinculadas al paso de frentes que, tanto si es frío como cálido, supone la existencia de una zona frontal en el contacto de la masa fría superficial con la masa cálida suprayacente.

La mejor forma de detectar las inversiones térmicas, que son indicadores de existencia de un techo que impide el movimiento ascendente del aire, es mediante sondeos que registran la estructura térmica de la baja troposfera, al menos de la capa límite. En este trabajo, ante la inexistencia de sondeos sistemáticos de la baja troposfera barcelonesa, hemos utilizado como estimación del perfil térmico desconocido, las temperaturas mínimas diarias de dos observatorios meteorológicos de la máxima fiabilidad, situados en la periferia del área urbana:

— El observatorio del aeropuerto de El Prat, situado al sur de la aglomeración barcelonesa, a unos 12 metros de altura.

— El observatorio Fabra, situado a 412 metros de altura, en la vertiente SE del Tibidabo, dominando la ciudad que se extiende entre sus laderas y el mar.

Se ha calculado la diferencia de temperaturas mínimas diarias entre El Prat y Fabra, como parámetro estimador de la estabilidad atmosférica. En efecto, en condiciones de gradiente adiabático la temperatura del observatorio Fabra sería unos 4°C más baja que la de El Prat; en condiciones superadiabáticas la diferencia sería mayor y, por el contrario, cuando las diferencias térmicas se vayan reduciendo hasta hacerse similares e incluso invertirse el signo, serán indicadores de condiciones de estabilidad.

Hemos centrado el estudio de la contaminación sobre la estación n.º 23 de la red municipal de Barcelona, sita en la calle Luchana, 29 que al ser de las que registran mayores niveles de contaminación es más sensible a los cambios meteorológicos. El período de análisis ha sido el otoño de 1985, que presentó episodios meteorológicos favorables a la acumulación de contaminantes. El final de otoño y comienzos del invierno suelen

registrar la mayor frecuencia de episodios de alta contaminación en nuestra región (Clavero, 1984). Se ha estudiado los índices de humos y SO_2 , así como el producto de ambos.*

ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN ESTADÍSTICA

La relación de causalidad entre un fenómeno y su posible causa nunca es de tipo funcional, por la complejidad de los fenómenos. El análisis estadístico nos permite estudiar la contingencia con que se presentan dos variables, establecer la relación de causalidad, verificar la significación de la correlación y concluir con la importancia del factor considerado sobre el fenómeno objeto de estudio. Es evidente que la existencia de correlación significativa no es condición suficiente de causalidad, pero sí condición necesaria. En este trabajo la estabilidad atmosférica, estimada a partir del comportamiento de las temperaturas mínimas de los dos observatorios citados es la variable independiente o explicativa, mientras que los niveles de inmisión de SO_2 y de humos, así como el producto de ambos, constituyen las variables dependientes o explicadas. Se trata de una relación de causalidad unilateral, la estabilidad atmosférica influye en los niveles de contaminación, pero no a la inversa.

La gráfica adjunta (fig. 1) muestra el comportamiento inverso de la variable meteorológica, indicadora del grado de estabilidad atmosférica respecto de las dos variables de contaminación del aire, para el período setiembre a diciembre, en base a datos diarios. Para facilitar la comprensión y mejorar la significación de la correlación, y dado el carácter cronológico de las series estadísticas tratadas, los datos originales han sido suavizados mediante la técnica de medios móviles, banda de 5 en 5, que permite eliminar algunas fluctuaciones o "ruidos" no significativos. Destaca la curva de la variable térmica, siempre con valores inferiores a los que corresponden al gradiente adiabático saturado (2°C , aproximadamente) y el predominio de las situaciones de inversión térmica.

Cuando el contenido de humedad es alto, y esto es frecuente en el área urbana barcelonesa por su situación entre el mar y la cordillera litoral, el descenso térmico altitudinal se aproxima al gradiente pseudoadiabático o adiabática saturada, por la liberación del calor latente, y la atmósfera será menos estable. De ahí que las diferencias entre las temperaturas mínimas de los dos observatorios utilizados sean pequeñas en los episodios de inestabilidad, mientras que en las situaciones estables las inversiones térmicas se presentan con gran rapidez, de forma que las temperaturas mínimas sean normalmente más altas en el observatorio Fabra que en El Prat. Así en 1985 la temperatura media de las mínimas fue $0,3^\circ\text{C}$ más alta en el observatorio Fabra fruto de 202 días en que las temperaturas mínimas fueron más bajas en el Aeropuerto y en otras 8 ocasiones fueron iguales. La explicación de esta anomalía térmica debe estar, sin duda, en la mayor humedad existente en El Prat por su mayor proximidad al mar, por un lado, y en menor medida por la situación del observatorio Fabra, orientado hacia el E, y la posible influencia del efecto de "isla de calor" de la ciudad que las brisas marinas pueden empujar hacia el Tibidabo.

Las dos variables indicadoras de la contaminación del aire barcelonés presentan una curva groseramente paralela, con valores más altos y mayor amplitud en las oscilaciones en la correspondiente a humos (con un máximo de $7/3 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ y prácticamente siempre superiores a 100). La curva correspondiente al SO_2 , casi siempre por encima de $57 \mu\text{gr}/\text{m}^3$, umbral de significación que separa las áreas contaminadas de los valores de fondo correspondientes al medio rural circundante, alcanza un máximo de $288 \mu\text{gr}/\text{m}^3$. En general se observa que a cada brecha en la curva térmica le corresponde un "pico" en

*Los datos de contaminación utilizados proceden de "El medi atmosfèric a les comarques de Barcelona" correspondientes a los meses de setiembre, octubre, noviembre y diciembre de 1985, que publica la Diputació de Barcelona, en colaboración con el Instituto Nacional de Meteorología.

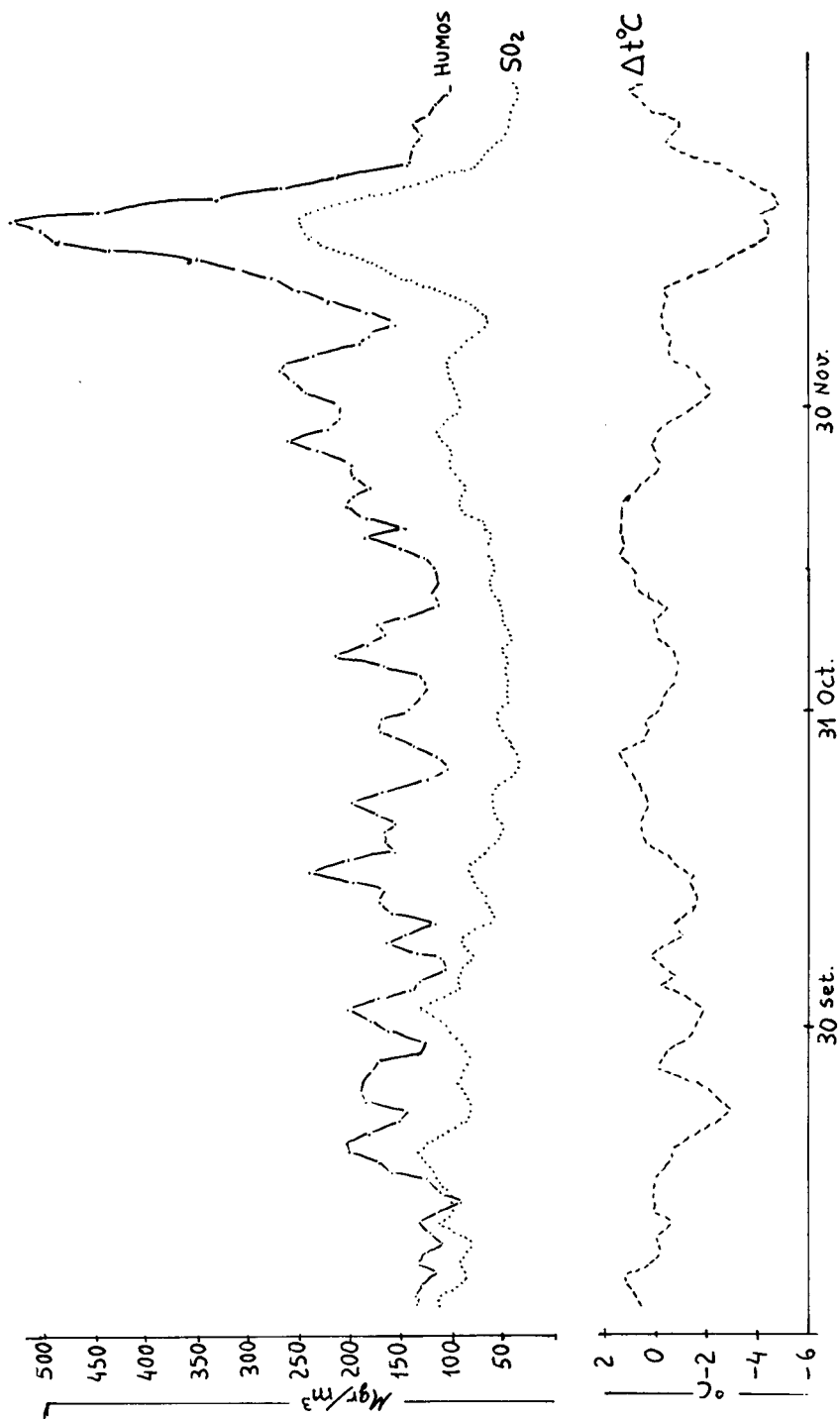


Figura 1. Niveles de contaminación en relación con la estabilidad atmosférica de Barcelona. Período setiembre-diciembre de 1985.

las curvas de contaminantes y viceversa, al aumentar la variable térmica se produce un descenso en los niveles de contaminación. Particularmente claro es el episodio que se prolonga desde finales de noviembre hasta comienzos de la última decena de diciembre. Todo ello anuncia cualitativamente una correlación entre la variable térmica y los dos índices de contaminación. En efecto, del análisis estadístico se desprenden unos coeficientes de correlación de Pearson, r , muy significativos. Si se hace referencia al conjunto de todo el período se obtiene $r = -0,71$ para la variable humos, valor que supera ampliamente el umbral de significación habitualmente utilizado:

$$r = |0,71| \sqrt{120} = 7,78 > 1,96 \text{ (para riesgo del 5 \%)}$$

y también superior a 3,08, indicador del error 1 %. El coeficiente de Pearson aumenta al reducir el período; así es de $-0,79$ si se considera sólo diciembre y noviembre, y llega a $-0,83$ si se reduce a sólo el mes de diciembre. Valores similares se obtienen, aunque la gráfica pueda dar una imagen de menor relación, al considerar los valores de SO_2 :

$r = -0,70$ para los 120 días del conjunto del período

$r = -0,79$ si se prescinde de septiembre

$r = -0,88$ para sólo el mes de diciembre

y prácticamente iguales si se realiza la correlación para el producto $SO_2 \times$ humos, práctica que suele ser usual por la acción sinérgica entre los dos indicadores utilizados. Así se obtiene:

$r = -0,83$ para el mes de diciembre

$r = -0,79$ para el conjunto de noviembre y diciembre

$r = -0,77$ para octubre, noviembre y diciembre

$r = -0,71$ para todo el período.

Teniendo en cuenta que el coeficiente de determinación, cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson calculado, expresa en tantos por uno, la parte de variación explicada por una causa, es evidente que la situación de estabilidad que hemos estimado explica en cualquier caso más del 50 % del fenómeno analizado, llegando casi al 80 % en caso de considerar sólo el mes de diciembre (SO_2).

EXPLICACIÓN SINÓPTICA

El análisis sinóptico del período estudiado muestra el predominio de las situaciones anticiclónicas, sobre todo en los meses de septiembre y diciembre. Así, las precipitaciones fueron casi inapreciables en septiembre (2 mm en Barcelona, 5 en El Prat) y débiles en diciembre (11 mm en Barcelona, 39 en El Prat). Más importantes fueron en noviembre que totalizó 63 mm en Barcelona y 52 en El Prat, aunque la mayor parte se produjeron en un sólo día. Octubre, sin embargo, fue lluvioso (148 mm en Barcelona, 163 en El Prat), fruto de precipitaciones en los días 5, 8, 17, 18, 21, 24, 25, 26, 27 y 28.

El mes de septiembre presentó una gran estabilidad con la excepción del período 25-27 en que la presencia de una "gota fría" en altura originó las únicas precipitaciones apreciables. La primera quincena se caracterizó por una sucesión de situaciones anticiclónicas y de pantano barométrico combinadas con débiles advecciones anticiclónicas que mantienen unos niveles moderados de contaminación; del 16 al 24 tiene un claro carácter anticiclónico y los indicadores de contaminación se elevan. Finalmente, tras la disipación de la gota fría, se inicia otro período anticiclónico que se prolonga hasta el 4 de octubre

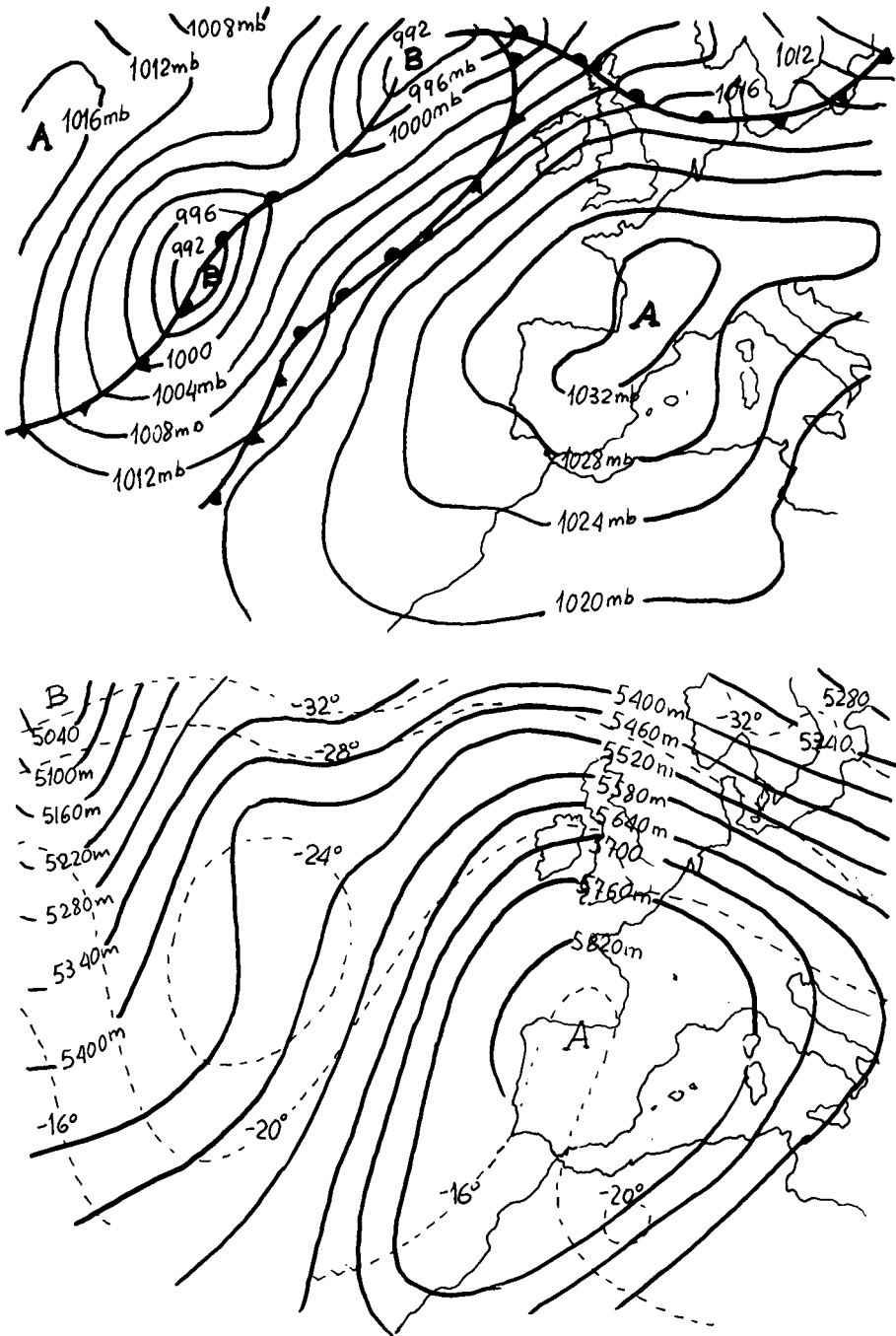


Figura 2. Situación sinóptica característica de un episodio de alta contaminación en Barcelona (14-XII-1985). Mapa isobárico de superficie (arriba) y topografía de 500 mb (abajo).

en que una depresión de origen atlántico origina débiles precipitaciones (2 mm en Barcelona, 4 en El Prat). Se instala un pantano barométrico hasta el día 8 en que el paso de un frente frío del NW ocasiona fuertes precipitaciones (27 mm en Barcelona, 12 en El Prat) y un notable descenso en los niveles de contaminación ($75 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ en humos y 38 en SO_2). A partir del día 10 se instala un anticiclón que se prolonga hasta el 17 en que una advección de levante propicia precipitaciones importantes (25 mm en Barcelona, 24 en El Prat), así como el 19 (29 mm en Barcelona, 17 en El Prat), intensificándose las precipitaciones por la presencia de gota fría a partir del 24 hasta el 27 (72 mm en Barcelona, 105 en El Prat) y reduciéndose la contaminación. Un pantano barométrico se inicia a partir del día 28 y la contaminación se eleva hasta $275 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ de humos el día 30, volviendo a descender por la llegada de una advección del W el día 3 de noviembre, que es seguida por una advección anticiclónica del SW que domina hasta el día 10, en que es sustituida por una depresión centrada que produce fuertes precipitaciones (55 mm en Barcelona, 37 en El Prat) y un ancho valle en la curva de humos. Del 15 al 23 se caracteriza por la presencia de una advección de levante con gota fría en altura, que produce escasas precipitaciones y va elevando los niveles de contaminación, a pesar de que el día 26 esté dominado por una depresión centrada que también origina precipitaciones aunque de escasa consideración. En toda la segunda quincena sólo se totalizan 8 mm en Barcelona y 15 en El Prat.

A partir del día 28 de noviembre se inicia un largo episodio anticiclónico sólo interrumpido por una depresión los días 8 y 9 de diciembre, que ocasiona precipitaciones (14 mm en Barcelona y 35 en El Prat) y un descenso ostensible de la contaminación. La cuña anticiclónica que penetra los días 10 y 11 conduce a un potente anticiclón centrado que el día 13 ya presenta 1032 mb, extendido desde Canarias al Centro de Europa (figura 2) y bloqueando la circulación zonal, que discurre por la vertiente NW de este área anticiclónica hasta Escandinavia. En altura se corresponde con una potente dorsal de las altas presiones subtropicales que a partir del día 13 ya individualiza un anticiclón sobre la Península Ibérica, al menos hasta el nivel de 500 mb. El carácter cálido y dinámico de este anticiclón origina fuerte subsidencia desde estos niveles atmosféricos y produce intensas inversiones térmicas, perceptibles no sólo a nivel local (las temperaturas mínimas del observatorio Fabra son desde el día 14 al 21 entre 3,6 y 7,8°C más altas que El Prat), sino también a escala regional: el día 16 la temperatura mínima del Montseny, a 1700 m de altura, es de 9°C, mientras en Gerona se registra -1°C, en Reus 4°C y en El Prat 7. La contaminación alcanza los máximos valores del período estudiado: $592 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ de humos el día 16 y 713 el día 17, mientras en SO_2 se registran $280 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ el día 17 y 288 el día 18. El episodio concluye el día 23 en que una advección del W destruye la inversión térmica y barre la contaminación. Esta situación domina hasta el día 27 en que es substituida por una advección ciclónica del SW y a partir del 28 por una depresión centrada, que aunque apenas produce precipitaciones (7 mm en Barcelona, 5 en El Prat para el conjunto de toda la segunda quincena), dispersa los contaminantes, que, por otro lado, se ven muy reducidos en su emisión por la menor actividad urbana e industrial de las fiestas navideñas ($27 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ de SO_2 el día 31 y $51 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ de humos el día 30).

CONCLUSIÓN

Los niveles de contaminación medidos en la estación 23 muestran una dependencia clara de la situación atmosférica, puesta de manifiesto tanto en la correlación estadística referida a la estimación de la estabilidad atmosférica, como en la explicación sinóptica. Es de destacar que la utilización de la técnica de las medias móviles reduce la influencia de los fines de semana y días festivos que registran fuertes descensos de la contaminación por la reducción de la actividad urbana y que hacen disminuir la correlación.

Debido a la alta correlación estadística obtenida hemos calculado las rectas de regresión correspondientes a los tres índices de contaminación, en función del parámetro T

que estima la estabilidad atmosférica: Para todo el período la correspondiente al índice de SO_2 es, en $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ y T en $^\circ\text{C}$:

$$Y = -21,77 T + 72,46$$

Las dos rectas de regresión se cruzarán en el punto:

$$M_T = -0,69^\circ\text{C} \quad M_Y = 87,46 \mu\text{gr}/\text{m}^3 \text{ de } \text{SO}_2$$

determinado por las medias de T e Y .

Para el índice de humos la recta que expresa la relación, es:

$$Y = -41,14 T + 153,23, \text{ cruzándose las dos rectas en el punto}$$

$$M_T = -0,69^\circ\text{C} \quad M_Y = 181,58$$

Finalmente, para el producto $\text{SO}_2 \times$ humos, expresado en miles, se obtiene:

$$Y = -11,54 T + 10,73$$

Creemos, por tanto, que se ha contribuido a la identificación de peligro de este impacto ambiental que sufren las grandes aglomeraciones urbanas e industriales con un nivel tecnológico que permita la generación de contaminantes derivados de las combustiones de carburantes fósiles. Las correlaciones establecidas permiten hacer estimaciones de los niveles de contaminación en SO_2 y humos que cabe esperar en función de las condiciones meteorológicas reinantes. Ahora bien, es evidente que desde el punto de vista de la mitigación del impacto, dada la imposibilidad de actuar sobre las condiciones atmosféricas, todos los esfuerzos se han de centrar en la reducción de producción de contaminantes, actuando sobre las fuentes de emisión, como queda de manifiesto por el claro ritmo semanal, en el que el fin de semana experimenta un brusco descenso en los niveles de inmisión, independientemente de la situación atmosférica.

Bibliografía

- AYALA, F.J. (1990): Los peligros naturales en las evaluaciones de impacto ambiental en obras civiles, *Boletín Geológico y Minero*, vol. 101, n.º 6 I.T.G.E. Madrid.
- CLAVERO, P. (1984): Aproximación al estudio de la incidencia de la situación atmosférica en la contaminación del aire sobre Barcelona (1978-1982), *III Coloquio Ibérico de Geografía. Actas y Comunicaciones*, Barcelona.
- PUIGSERVER, M. (1979): "Atmósfera y contaminación atmosférica", *Investigación y Ciencia*, n.º 37.

Résumé

Ce travail analyse la relation de causalité entre la stabilité atmosphérique et la contamination de l'air urbain de Barcelone. On obtient une haute corrélation négative qui permet le calcul de la recte de régression pour décrire le phénomène et faire des prédictions à propos des niveaux de SO_2 et fummes enregistrés en relation à la situation atmosphérique.

Abstract

This work studies the relation of atmospheric causality between the atmospheric stability and the contamination of urban air of Barcelona. We have obtained a high negative correlation which allows to calculate the straight of regression to describe the matter and to do future predictions about the levels of SO₂ and smokes in relation with the atmospheric situation.