

1.5. USOS Y CARACTERISTICAS DEL MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE¹

El monitoreo del aire es una fase fundamental de cualquier programa de control de la contaminación, porque permite determinar en dónde están presentes los contaminantes, cuáles son ellos y cuáles son sus concentraciones.

Los datos del monitoreo atmosférico son útiles para:

- determinar a lo largo del tiempo los niveles de calidad del aire,
- evaluar el avance en el cumplimiento de las normas de calidad del aire,
- determinar las líneas basales de la calidad del aire antes del inicio de operación de nuevas fuentes de emisión,
- desarrollar y evaluar los modelos de dispersión,
- identificar episodios atmosféricos y así activar los programas de control, y
- establecer correlaciones entre la contaminación atmosférica y los efectos en la salud humana.

Los actuales sistemas de monitoreo se basan en diversas consideraciones, siendo las más relevantes las características químicas, el estado físico y la concentración esperada de los contaminantes. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América ha establecido los métodos federales de referencia para el muestreo y el análisis de los contaminantes "criterio". Todos los procedimientos disponibles están diseñados para determinar la concentración real de un contaminante en la muestra. La concentración se expresa en términos de masa por unidad de volumen, habitualmente microgramos por metro cúbico.

Los métodos nacionales de referencia pueden ser manuales o automáticos, y especifican de manera detallada los procedimientos de muestreo y análisis (Cuadro 1); mediante técnicas de control y seguridad de calidad desde la toma de muestra, hasta la validación de los datos, se garantiza la utilidad de los datos. El punto fundamental del control de calidad es la calibración, la cual permite asegurar que los procedimientos y el equipo son confiables en el muestreo y analiza con precisión los contaminantes. La "seguridad de la calidad" se refiere fundamentalmente al "control de calidad sobre el control de calidad" y verifica fundamentalmente la precisión de la calibración. Así como la calibración es la parte más importante del control de calidad, la auditoría es la parte más importante de la seguridad de la calidad. El carácter esencial de la auditoría consiste en comparar datos de muestras de aire con datos de muestras estandarizadas, o bien comparar diferentes análisis de la misma muestra.

¹ Resumido por H. Gutiérrez de: Environmental Protection Agency. Unit 4. Air Pollutants and their sources. In: Air pollution training Institute. *Air Pollution Control Orientation Course*. Triangle Park N.C. Environmental Research Training Center. EPA 1150/2-81-017 a.

CUADRO 1
METODOS DE REFERENCIA APROBADOS POR LA EPA (1981)

MANUAL		AUTOMATIZADO	
Referencia	Equivalente	Referencia	Equivalente
PST Método de grandes volúmenes		----	
PS Método de grandes volúmenes y espectro fotométrico de absorción atmosférica	Alto volumen y espectrometría de absorción atómica sin flama	----	
SO ₂ Pararosanilina	Technicon I Technicon II		Lear Siegler SM1000 (.5) Melay SA185-2A (.5, 1.0) Thermo Electron 43 (5, 1.0) Philips PW9755 (.5) Philips PW9700 (.5) Monitor Labs 8450 (5, 1.0) Asarco 500 (.5, 1.0) Beckman 953 (.5, 1.0) Melay SA285E (.05, .1, .5, 1.0) Monitor Labs 8850 (5, 1.0) Melay SA 700 (.25, .5, 1.0) Lear Siegler AM2020 (.5)
CO ---	----	Bendix 8501-5CA(50) Beckman 866(50) MSA 202S (50) Horiba AQM-10,11 y 12 (50) Monitor Labs 8310(50) Horiba 300E/300SA (20,50,100) MASS-CO 1 (50) Dasibi 3003 (50)	
O ₃ ---	----	Melay OA325-2R (.5) Melay OA350-2R (.5) Bendix 8002 (.5) McMillan 1100-1 (.5) McMillan 1100-2 (.5) McMillan 1100-3 (.5) Monitor Labs 8410E (5) Beckman 950A (.5) CSI 2000 (5)	Dasibi 1003-AH, PC, RS (5, 1.0) Philips PW9771 (5) Thermo Electron 49 (5, 1.0)
NO ₂	Arsenito de radio Arsenito de sodio Technicon TS6-ANSA	Monitor Labs 8440E (.5) Bendix 8101-C (.5) CSI 1600 (5) Melay NA530R (.1, .25, .5, 1.0) Beckman 952 A (.5) Thermo Electron 14 B/E (.5) Thermo Electron 14 D/E (.5) Bendix 8101-B (.5) Philip PW9762/02 (.5) Monitor Labs 8840 (5, 1.0)	

1.6. FACTORES METEOROLOGICOS¹

1. VARIABILIDAD EN EL TIEMPO Y EN EL ESPACIO; CONDICIONES METEOROLÓGICAS Y CLIMA

El tiempo, en el sentido de las condiciones meteorológicas, es difícil de definir; es la suma total de diversos estímulos atmosféricos a los que están sometidas las personas, las plantas y los objetos inanimados. Resulta fácil medir sus distintos elementos -temperatura, humedad, viento, nubosidad, precipitación, visibilidad, presión atmosférica y radiación, etc.- pero es difícil encontrar un índice combinado que integre todos estos factores en una sola escala. A esto se agrega el hecho de que dichos elementos fluctúan de un día a otro, incluso segundo a segundo, y que los valores medios y sus desviaciones típicas con frecuencia disimulan las tendencias a corto plazo o los valores extremos, que pueden tener enorme importancia para la respuesta de los receptores.

El clima es la síntesis de las condiciones meteorológicas, pero aquí también los promedios pueden ser engañosos. Incluso durante los dos últimos siglos, han habido anomalías que se prolongaron por unas décadas y no es posible definir periodos absolutos para calcular los promedios de los elementos meteorológicos. En climatología, se escoge un período estándar de referencia, de 30 años, de tal modo que puedan compararse las observaciones efectuadas en distintos lugares.

Las condiciones meteorológicas y el clima varían de un lugar a otro, incluso en los lados opuestos de un edificio o un árbol. En el caso de un ser humano que pasa del sol a la sombra e inversamente, está parte de su vida en el interior de edificios y usa vestimenta protectora, la elección de indicadores climáticos apropiados es verdaderamente difícil.

Además del factor de variabilidad (y de variabilidad de respuesta a las tensiones ambientales de receptores aparentemente semejantes), existe el problema de identificar los elementos meteorológicos que tienen mayor importancia en cada caso. Por ejemplo, el campesino y el que está de vacaciones, perciben el tiempo en formas un tanto diferentes. En las dos secciones siguientes se presta especial atención a los procesos meteorológicos relacionados con la gestión de la calidad del aire y con las reacciones de los receptores.

¹ Resumido por H. Gutiérrez de: Munn, R. E. Meteorología de la contaminación atmosférica. In: Suess, M. J. y Craxford, S. R. eds. *Manual de Calidad del Aire en el Medio Urbano*. Washington, D.C. Organización Panamericana de la Salud. 1980, Publicación Científica N° 401. pp. 115-145.

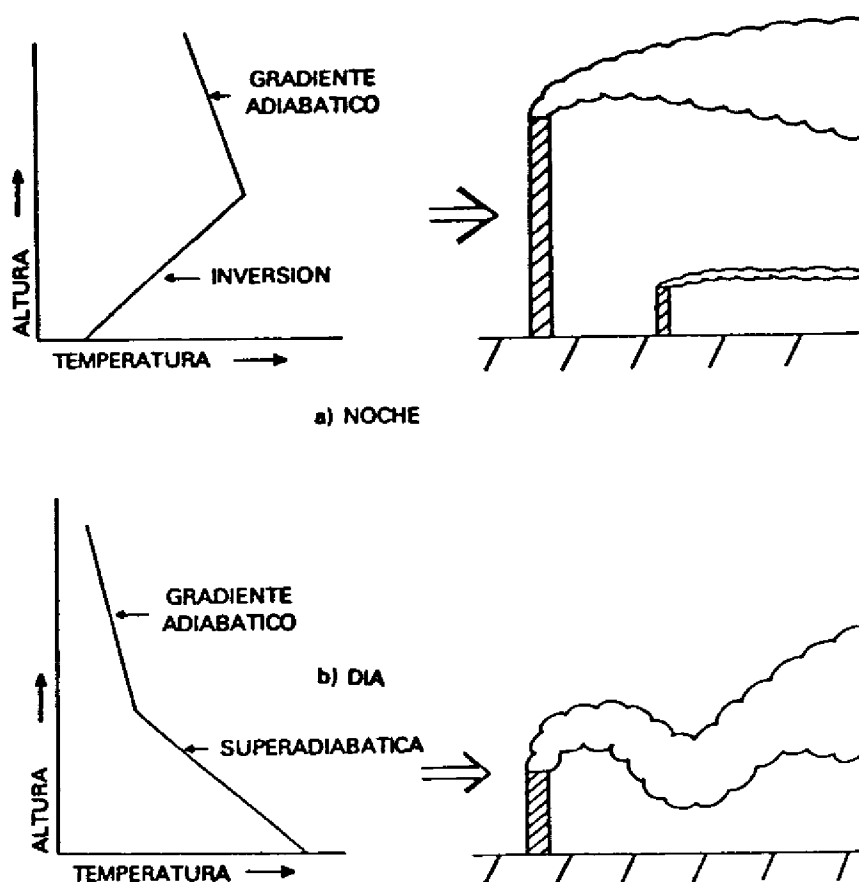
2. EL CICLO DIARIO CUANDO LAS CONDICIONES METEOROLOGICAS SON ESTABLES

Cuando, en terreno abierto y llano del campo, hace buen tiempo, existe un ciclo meteorológico diario. En la noche, el aire cercano al suelo se enfría más rápidamente que el aire a una altura de algunos cientos de metros sobre el nivel del suelo; se produce así una **inversión de la temperatura** (la temperatura aumenta con la altura) (véase la Figura 1 (a)). Una burbuja de aire que se eleva al azar de pronto se encuentra en un medio más caliente y comienza a descender². La inversión suprime la mezcla vertical y el resultado es una estratificación de los contaminantes atmosféricos. La inversión también disminuye la velocidad del viento cerca del suelo y se produce una aceleración compensadora en niveles superiores. La dispersión de los contaminantes liberados dentro de la capa de inversión resulta, por lo tanto, muy disminuida, tanto por la escasa ventilación horizontal como por la poca mezcla vertical. Sin embargo, los gases de las chimeneas altas quedan atrapados arriba.

Durante el día (Figura 1 (b)) el aire cercano al suelo se calienta más rápidamente que el aire que está a unos centenares de metros de altura. Una burbuja de aire que se eleva al azar permanece más caliente que el medio que la rodea hasta alcanzar una altura considerable (a veces unos kilómetros, sobre las regiones cálidas y secas). El límite superior de la zona de mezcla activa se llama **altura de mezcla** y recubre la **capa mezclada superficial**.

² En realidad, como la presión atmosférica disminuye con la altura, una burbuja de aire que se eleva debe expandirse y enfriarse (como el gas en la serpentina de un refrigerador). Si la burbuja no intercambiara calor con el medio, se enfriaría a un ritmo de 10 °C por cada 100 m de elevación (llamado gradiente adiabático o gradiente neutro). Este es el índice de referencia para determinar si desaparece o se acentúa la mezcla vertical. Cuando el aire está saturado, el enfriamiento adiabático es parcialmente compensado por la liberación del calor latente de condensación: la referencia pertinente la constituye entonces el gradiente adiabático húmedo, que es de aproximadamente 0,6 °C por cada 100 m.

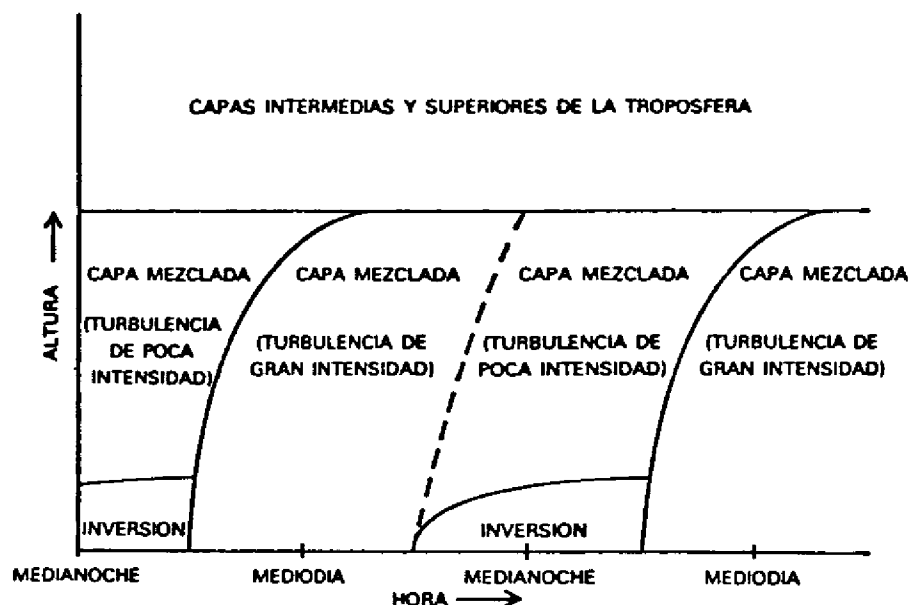
Figura 1. Estructura de la capa atmosférica superficial cuando las condiciones meteorológicas son estables: a) en la noche; b) durante el día.



En terreno campestre llano y abierto, cuando hace buen tiempo la altura de mezcla equivale a cero durante la noche, pero comienza a aumentar poco después de la salida del sol y alcanza su valor máximo a media tarde (Figura 2). La ruptura matutina de la inversión tiene una importancia especial. Se producen fuertes burbujas convección que ascienden hasta alcanzar los gases de las chimeneas que han permanecido arriba durante la noche. Los penachos se mezclan y descienden hasta el nivel del suelo, produciendo una **fumigación**. Esta es una de las causas de las típicas concentraciones máximas de la contaminación durante las mañanas.

El caso ideal descrito en esta sección resulta considerablemente modificado por las perturbaciones meteorológicas, la topografía y la presencia de zonas edificadas.

Figura 2. Estructura de las capas inferiores de la troposfera durante un periodo de 36 horas de buen tiempo.



3. PROCESOS METEOROLOGICOS EN GRAN ESCALA

En los centros de pronóstico se trazan mapas de los procesos meteorológicos de superficie, en gran escala, sobre la base de observaciones sinópticas (informes meteorológicos simultáneos elaborados cada tres o seis horas por una red mundial de estaciones meteorológicas, separadas por distancias de unos 200 km o más). Además, dos veces al día (a medianoche y a mediodía HMG) se preparan mapas de las capas atmosféricas superiores, basados en observaciones con radiosonda efectuadas por una serie menos numerosa de estaciones.

El anticiclón estacionario caliente tiene particular importancia para la calidad del aire de una región. La ventilación horizontal es escasa y se producen fuertes inversiones nocturnas de superficie. Además, el aire en los anticiclones calientes desciende lentamente y se producen **inversiones de subsidencia**. Estos inhibidores de la mezcla vertical están localizados a una altura de 2 a 3 km (a veces, sólo 1 km) y pueden persistir durante varios días. Una de las causas del "smog" en Los Angeles es que la región está bajo la influencia del anticiclón caliente semipermanente del Pacífico. En este aspecto, debe destacarse que los anticiclones calientes suelen presentarse sin nubosidad (a excepción de la niebla baja), de tal modo que las condiciones meteorológicas

favorecen las reacciones oxidantes fotoquímicas sobre zonas extensas (de 500 km o más de longitud), siempre que la radiación solar sea suficientemente fuerte. En el decenio de 1950, se consideraba que el "smog" de oxidantes era un fenómeno local de California. Ahora se ha observado en verano su presencia en zonas tan septentrionales como Canadá y Europa. Wisse y Velds (1), por ejemplo, descubrieron que en Vlaardingen, Países Bajos, las concentraciones de oxidantes superaron los $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en once días de verano y el otoño de 1968. En 10 de estas ocasiones la duración de la insolación fue considerable y se produjo una inversión de subsidencia a una altura inferior a los 2 km; en otros siete días, en que hubo una inversión similar pero la radiación solar fue escasa, la concentración de oxidantes no rebasó de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En ambos grupos de días el Grosswetterlage fue HM, es decir, un cinturón de alta presión sobre Europa Central.

Otro importante fenómeno meteorológico en gran escala es la **inversión de advección**, que se presenta cuando sopla aire caliente sobre agua fría o sobre una superficie nevada. Las grandes masas de agua responden lentamente al calor, mientras que la temperatura de la nieve o del hielo al derretirse está fija en 0°C ; en estos casos, la temperatura a unos cientos de metros de altitud puede ser de 10 a 20°C más alta que en el suelo y se produce una intensa inversión. En la situación opuesta, es decir cuando circula aire frío sobre una superficie más caliente, aquél se calienta y se vuelve inestable; la mezcla vertical puede extenderse a través de una capa muy ancha y se producen chaparrones y truenos.

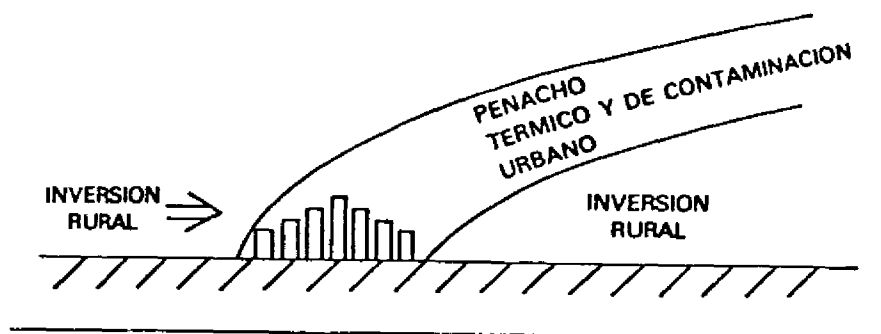
Finalmente es preciso mencionar la precipitación, causada por depresiones frontales, advección de aire frío sobre agua más caliente y ascenso orográfico del aire sobre terreno elevado o montañas. La precipitación barre la contaminación de la atmósfera recogiéndola dentro de las nubes antes de iniciar el descenso en forma de lluvia o nieve y también recogiendo según van cayendo las gotitas por debajo de las nubes. Se han realizado numerosas investigaciones teóricas y experimentales, descritas con algún detalle por Engelmann (2), sobre el barrido de la contaminación de penachos de humo en la proximidad de chimeneas. Los estudios regionales han resultado difíciles de efectuar por falta de datos completos sobre la distribución tridimensional de la contaminación y las nubes, y sobre las características de la precipitación (distribución de las nubes y de las gotas de lluvia por tamaño, intensidad de la precipitación, etc.). Sin embargo, el pronóstico sinóptico del barrido que efectúa la precipitación se ha intentado recientemente con algún éxito. En el ámbito climatológico, Munn y Rodhe (3) han demostrado que las tendencias en cuanto al depósito del azufre, por las precipitaciones, durante el período de 1952 a 1968, en el sur de Suecia podrían explicarse en su mayor parte por las variaciones seculares en la dirección de los vientos portadores de lluvia; las lluvias traídas por vientos del nordeste contenían mucho menos azufre que las asociadas con las corrientes de aire del sur y sudoeste.

Todos los procesos en gran escala mencionados afectan el ciclo diario "ideal" y algunas veces refuerzan, y otras suprimen, la capacidad de la atmósfera para dispersar la contaminación.

4. PROCESOS METEOROLOGICOS EN MEDIANA ESCALA

Siempre que hay diferencias importantes en las características de la superficie en mediana escala (5 a 50 km), los patrones meteorológicos regionales se alteran de manera sustancial. Se puede producir la circulación de vientos locales cuando el cielo está despejado y los vientos regionales son ligeros; sirvan de ejemplo las brisas terrestres y marinas, los vientos en laderas y valles y las corrientes de aire urbanas. La estructura de la capa superficial puede también resultar considerablemente modificada por vientos de moderados a fuertes, después de que el aire ha traspasado una discontinuidad del terreno, es decir, pasando del agua a la tierra o del campo abierto a un bosque o ciudad. Se forma una capa límite al entrar en contacto con el nuevo tipo de superficie que se va engrosando en la dirección del viento. En el caso de una ciudad, el concepto de capa límite (véase Figura 4) a menudo puede estar muy idealizado a causa de la distribución no aleatoria de los edificios, parques y calles. Sin embargo, hay abundantes pruebas experimentales de que existe una capa superficial urbana bien mezclada³ (a veces de varios cientos de metros), aun cuando en las zonas rurales circunvecinas haya una fuerte inversión con base en el suelo. Así mismo, una inversión de advección que pasa del mar a la tierra es erosionada por abajo, pero aún persiste arriba varios kilómetros tierra adentro. En ambos casos, la mezcla con la capa límite es favorecida por los aportes de calor de las nuevas superficies (calentamiento atmosférico convectivo al adentrarse en tierra; emisión artificial de calor en las ciudades).

Figura 3. Capa límite urbana.



³ En el centro de Budapest, por ejemplo, la altura de mezcla nocturna tiene un promedio de unos 80 m (4).

La meteorología urbana tiene un interés particular para los estudios sobre contaminación atmosférica. Se ha analizado con algún detenimiento este tema en un simposio de la Organización Meteorológica Mundial (5). Un rasgo característico de las ciudades es la **isla urbana de calor** que se observa aun en ciudades pequeñas. En la Figura 4 se presenta un patrón típico que muestra las isotermas de las temperaturas mínimas de Londres en una noche despejada (6). La isla de calor se produce también con los vientos regionales moderados, pero es desplazada del centro urbano en la dirección del viento.

La isla urbana de calor a menudo da origen a la circulación de vientos locales, con el aire caliente que se eleva sobre el centro de la ciudad y una corriente compensadora de aire más frío del campo, que penetra en la zona urbana a niveles bajos. En el caso de una ciudad situada en la costa o en un valle, pueden haber varias corrientes de aire simultáneas en interacción; a menudo es difícil esclarecer los detalles de la situación y se requieren investigaciones experimentales especiales. A este respecto, debe señalarse que la peor calidad del aire a menudo se presenta en esas ocasiones.

Las ciudades afectan el clima en muchas formas. En comparación con el campo circundante, generalmente hay menos viento en la ciudad (pero a veces más ráfagas) y menos nieve, si bien la precipitación total es ligeramente superior. Resulta de especial interés para los estudios sobre la salud, el hecho de que la radiación solar, especialmente los rayos ultravioleta, es reducida por el manto de contaminación urbana. Landsberg (7) ha sugerido que la radiación ultravioleta disminuye en las ciudades en un 30% en invierno y en un 5% en verano. Existe también un pequeño, pero detectable, ciclo semanal en el comportamiento de muchos elementos meteorológicos, que responde al ciclo semanal de las actividades humanas (8).

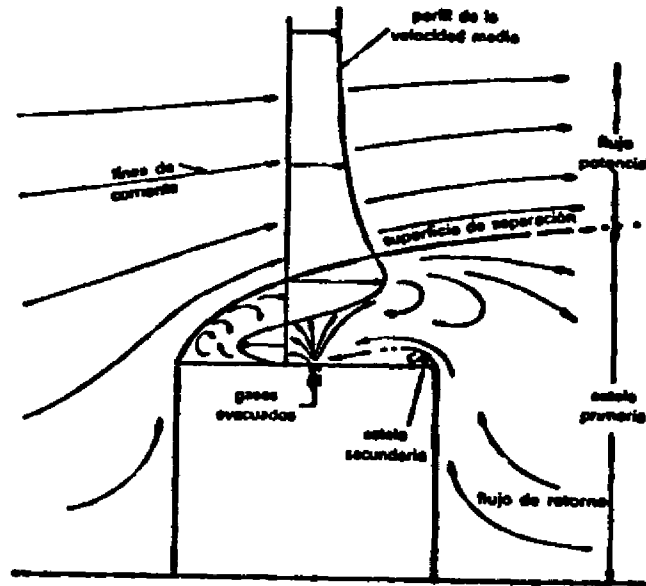
5. PROCESOS METEOROLOGICOS EN PEQUEÑA ESCALA

Las capas límite se forman no sólo en la línea costera y en los bordes a contraviento de las ciudades (Figura 3), sino también sobre un edificio o, incluso, una sola hoja. Ryde (9) ha usado el término **envoltura climatológica** para referirse al espacio alrededor de un edificio, dentro del cual se producen anomalías específicamente locales en lo que concierne al viento, la temperatura, la humedad, la precipitación y la humedad del suelo. En la Figura 5 se muestra un patrón típico del flujo del aire. Es posible predecir con bastante aproximación los efectos aerodinámicos en la estela de un cilindro, plancha o esfera. En el complejo escenario de una zona construida, o, incluso, en un terreno de labradío salpicado de árboles, cercas o graneros, es difícil pronosticar los patrones de flujo. Si se cambia el ángulo de ataque del viento, hasta cuando se trata de un objeto sencillo como un cubo, se producen diferencias importantes en las características de la estela. Los efectos

producidos por los edificios son importantes para los estudios sobre la contaminación atmosférica en dos aspectos:

- 1) difusión de los contaminantes que emanan de chimeneas bajas y conductos de ventilación, y
- 2) emplazamiento de los sensores meteorológicos y de contaminación atmosférica.

Figura 4. Flujo de aire sobre un edificio.



En escala aún menor, la captación de contaminantes por la superficie depende de características interfaciales (si, por ejemplo, están abiertos o cerrados los estomas de las hojas) y del ritmo con que la contaminación llega al plano interfacial (índice de transferencia). Este último factor es meteorológico y merece atención.

La mezcla turbulenta sobre la superficie nunca es completa y se convierte en un factor limitante poderoso, en condiciones de inversión⁴. La mezcla también resulta inhibida por las capas límite que se forman sobre cada hoja y las pequeñas obstrucciones superficiales al curso del viento. A menudo es bajo el índice de intercambio con la corriente de aire principal que está arriba y se produce la resistencia de las capas límite. Como resultado, casi siempre existen gradientes verticales de viento, temperatura, humedad y contaminantes sobre las superficies, incluso en condiciones ideales, como sobre una extensa pradera. El óxido nítrico

⁴ En una escala mucho mayor, el penacho de una chimenea queda atrapado arriba cuando se produce una inversión con base en la superficie.

tiene el gradiente vertical menor, lo que indica un índice de captación muy pequeño. A este respecto, es importante señalar que el índice de transferencia, más que la **concentración de aire** sobre una superficie, es lo que determina si un receptor será o no dañado por la contaminación. Muckammal (10), por ejemplo, pudo demostrar la evidente relación entre el índice de transferencia de los oxidantes y la aparición de manchas en las hojas de tabaco.

Naturalmente, las características físicas y biológicas de las superficies son factores importantes para determinar el índice de captación.

La captación del bióxido de azufre de la atmósfera es mayor en una superficie de piedra caliza o en un lago cuyas aguas sean levemente alcalinas. Sin embargo, Braun y Wilson (11) descubrieron que la absorción de bióxido de azufre por la piedra de los edificios era mayor en el laboratorio que al aire libre, debido probablemente a diferencias en la resistencia de la capas límite.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Wisse, J. A. y Velds, C. A. Preliminary discussion on some oxidant measurements at Vlaardingen, the Netherlands. *Atmos Environ* 4:79-85, 1970.
2. Engelmann, R. J. The calculation of precipitation scavenging. In: United States Atomic Energy Agency, *Meteorology and Atomic Energy*. Washington, D.C., USA, AEA, 1968. pp. 208-221.
3. Munn, R. E. y Rodhe, H. On the meteorological interpretation of the chemical composition of monthly precipitation samples. *Tellus* 23:1-13, 1971.
4. Popovios, M. y Szepesi, D. J. Diffusion climatological investigations in Hungary. In: *Proceedings of the Second International Clean Air Congress*. Nueva York: Academic Press, 1971, pp. 1073-1076.
5. Organización Meteorológica Mundial. *Urban Climates*. Ginebra. WMO Technical Note 108. 1970.
6. Chandler, T. London's urban climate. *Geograph J* 127:279-302, 1962.
7. Landsberg, H. E. Meteorological observations in urban areas. *Meteorol Monogr* 11(33):91-99, 1970.
8. Lawrence, E. N. Urban climate and the day of the week. *Atmos Environ* 5:935-948, 1971.
9. Ryde, H. *The Importance of Meteorology in Building* Geneva. World Meteorological Organization. 1970. WHO Technical Note 109. pp. 23-36.
10. Mukammal, E. I. Ozone as a cause of tobacco injury. *Agric Meteorol* 2:145-165, 1965.
11. Braun, R. C. y Wilson, M. J. G. The removal of atmospheric sulfur by building stones. *Atmos Environ* 4:371-378, 1970.