

LAS INVESTIGACIONES SOBRE CLIMA URBANO Y CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN LA REPÚBLICA FEDERAL DE ALEMANIA

Por *Ernesto Jáuregui O.**

RESUMEN

Se hace una sintética descripción de las investigaciones de climatología urbana en Alemania, las cuales se iniciaron formalmente hace unos 40 años.

El autor compara las alteraciones climáticas y los niveles de contaminación observados en varias ciudades alemanas y en la ciudad de México.

SUMMARY

The paper presents the analysis of the various investigations made on urban climate in Germany, mostly since 1930.

The author gives the values of climatic alterations and pollution levels in several German cities and he compares them with the values found for Mexico City.

I. INTRODUCCIÓN

Los estudios sobre clima urbano en Alemania datan de fines del siglo XVIII; en 1787 Franz Xaxier Epp describía en un memorando dirigido a la Academia de Ciencias de Bavaria la terrible bruma y olor producidos por la ciudad de Munich. En el transcurso del siglo XIX aparecen las primeras valuaciones climáticas de algunas grandes ciudades europeas. Así, en el año de 1833, el meteorólogo inglés Luke Howard comparó las temperaturas de varios puntos de la ciudad de Londres observando el efecto que ésta producía en la distribución de las temperaturas. Posteriormente, el francés H. Renou (1862) advirtió las diferencias de la temperatura del aire en el observatorio de Mont Souris en

París y el suburbio de Choisi-le-Roi, encontrando que la estación del centro registraba temperaturas mínimas más elevadas y una amplitud térmica diurna menor.

El método de investigación usado en estos primeros estudios dependía de las observaciones hechas en un número limitado de estaciones fijas que generalmente eran dos. Pero en 1927 W. Schmidt introdujo el método de la travesía del área urbana en automóvil, haciendo lecturas termométricas en la ciudad de Viena, y en 1929 el climatólogo alemán Albert Pepler realizó recorridos se-

* Investigador del Instituto de Geografía de la UNAM; actualmente en el Instituto Geográfico de la Universidad de Bonn.

mejantes en la ciudad de Karlsruhe utilizando un termómetro de aspiración tipo Assman.

Estos estudios demostraron que las áreas ocupadas por edificios y calles asfaltadas eran considerablemente más cálidas que los campos de los alrededores.

Al finalizar la década de los años treinta, las investigaciones de Linke (1940) y Stummer (1939) en la ciudad de Francfort habían conducido a un mayor conocimiento de los cambios climáticos dentro del área urbana y, así, Stummer, por medio de recorridos en automóvil, determinó los contrastes de temperatura entre el centro de la ciudad y los suburbios, observando también la distribución de los vientos superficiales que fluyen hacia el centro de Francfort debido, por una parte, al efecto térmico y, por otra, a la topografía del valle donde se encuentra la ciudad.

De la misma época es el estudio hecho por E. Reichel (1933) quien midió diferencias de temperatura de 10° entre el centro de Berlín y sus alrededores, en una helada noche de febrero cuando la ciudad se encontraba cubierta por la nieve. En ese mismo año Budel y Wolf (1933) investigaban el clima de la ciudad de Munich. Posteriormente la climatología urbana ha continuado desarrollándose en forma creciente en Alemania, con estudios cada vez más elaborados sobre las condiciones químicas y físicas del aire citadino.

En seguida se describen algunos de los resultados de dichas investigaciones, al mismo tiempo que se comparan éstos con los observados por el autor para la ciudad de México.

II. LA ISLA DE CALOR URBANO

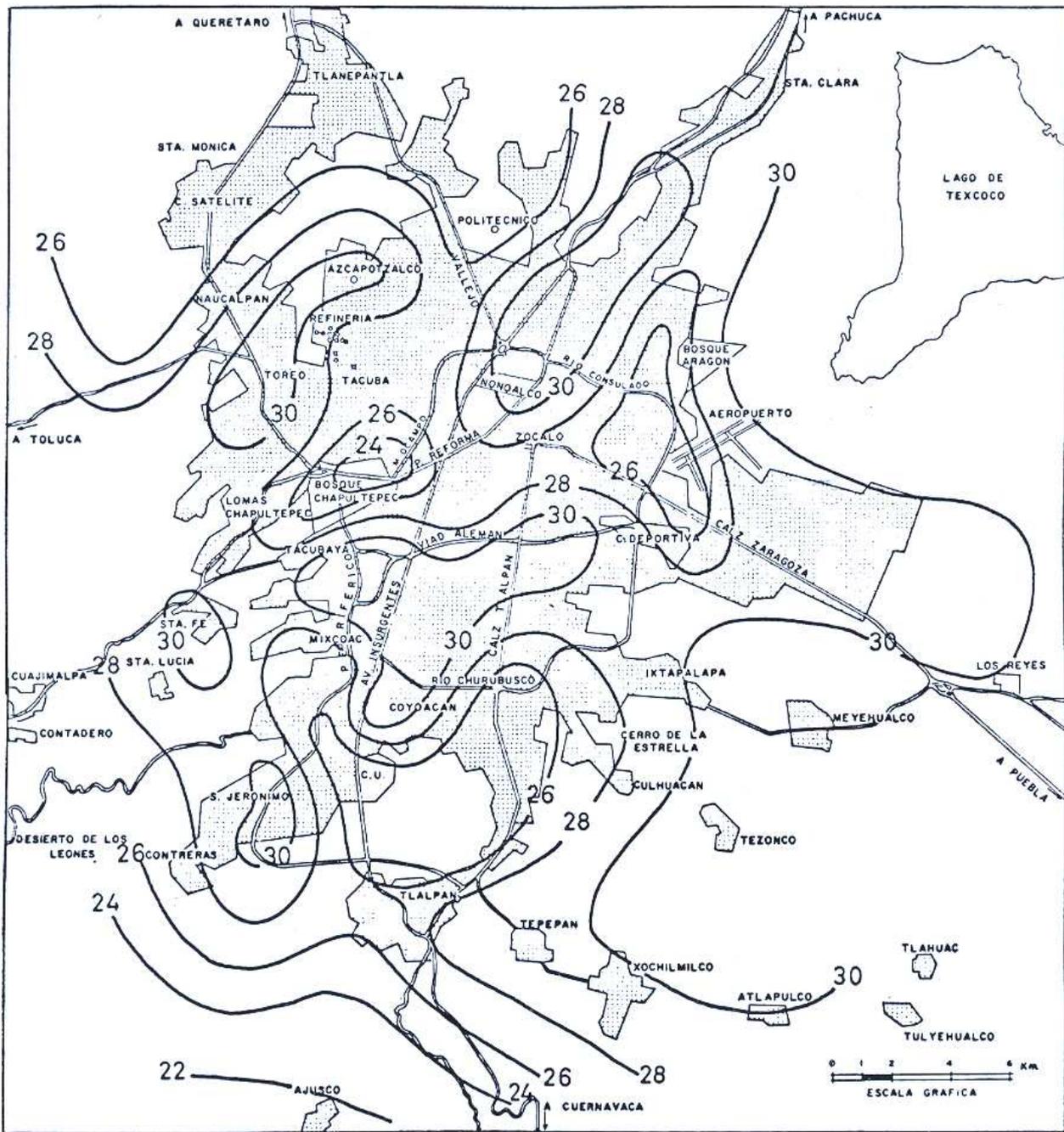
Uno de los efectos más notables del clima urbano es, desde luego, la diferencia de temperaturas que se observa entre la ciudad y sus alrededores. Es el llamado efecto de la 'isla de calor'. Si bien en un principio la literatura sobre este tema hacía hincapié en la isla térmica como resultado de la acumulación de edificios y la generación de calor en el área urbana (ver por ejemplo Kratzer, 1954), las investigaciones más recientes se orientan hacia el efecto originado por la contaminación del aire citadino. Así, H. Georgii (1969) señala que, al examinar el clima urbano, con-

viene distinguir entre las modificaciones del clima debidas a la acumulación de edificios, por una parte, y, por otra, a la alteración del clima originada por la contaminación del aire.

R. Geiger (1965), entre otros autores, señala que la razón básica de las diferencias térmicas en el clima urbano es la alteración del equilibrio de calor e hídrico. Esto se debe a la sustitución del suelo natural por superficies de piedra, concreto, pavimento, metal o tabique, por las cuales el agua de lluvia escurre rápidamente casi en su totalidad. Además, la ciudad tiene una cantidad creciente de fuentes de calor debidas a la industria, a los vehículos de combustión interna y a la calefacción de los locales (en el caso de la ciudad de México este último factor tiene muy poca importancia ya que los inviernos son benignos en la capital).

Ya en 1917 W. Schmidt estimaba que para la ciudad de Viena el calor generado era entre un sexto y un cuarto del total de la radiación solar recibida; mientras que para Berlín esta cifra ascendía a un tercio. Más recientemente Garnett y Bach (1965) han calculado esta relación para la ciudad de Sheffield en Inglaterra y encuentran que el calor producido ahí representa cerca de un treinta por ciento de la radiación neta. Podría pensarse que las diferencias térmicas entre la ciudad y el campo serían máximas en invierno, cuando se requiere más calefacción en las ciudades europeas. Sin embargo, parece ser que los vigorosos vientos invernales aumentan la advección de calor hacia fuera de la ciudad.

El climatólogo alemán A. Kratzer encuentra que durante el día las temperaturas en la ciudad son más o menos las mismas que en los alrededores y aun más bajas. Un resultado semejante ha observado el autor en la ciudad de México, como puede apreciarse en la fig. 1 que muestra la distribución de las temperaturas máximas en el mes de marzo; en las áreas verdes como el bosque de Chapultepec o en la vecindad de la ciudad universitaria no son tan elevadas debido a la influencia de la vegetación. En todo caso, los contrastes térmicos no son tan marcados en el día en el área urbana de la capital. Por otra parte, Chandler (1965) ha presentado un caso en el que había una isla de



INSTITUTO DE GEOGRAFIA
 U. N. A. M.
 DIBUJO: WILFRIDO AYALA

FIG. 1 . TEMPERATURA MAXIMA PROMEDIO EN MARZO. (grados centigrados)

calor en pleno día en la ciudad de Londres, aunque no tan marcado como durante la noche.

Aun cuando no haya diferencias durante el día en la temperatura del aire, el centro de la ciudad se siente más caluroso a causa del calor que irradian los muros y pavimentos y a una menor ventilación. La diferencia de temperaturas mínimas entre el centro de Londres y los suburbios llega a ser de 6° a 7° según Chandler (1962). Las mediciones hechas por G. Stummer (1939) en la ciudad de Francfort revelan una diferencia de 4° . H. Emonds (1954) observó que en la ciudad de Bonn la isla de calor es de 3.5° y que en esta pequeña ciudad (unos 15 km^2) a orillas del Rhin, la humedad relativa decrece en un 16 por ciento. A. Pepler (1929) encontró un contraste térmico de hasta 5° en la ciudad de Karlsruhe.

Observaciones climáticas semejantes para otras ciudades de Alemania han sido realizadas por otros autores, tales como: M. Kalb

(1962) en Colonia, W. Eriksen (1964) en Kiel y J. M. Hamm (1969) en Stuttgart (fig. 2). Estos autores, al mismo tiempo que observan la isla de calor en diversas condiciones de nubosidad y viento, señalan los tipos de tiempo que están asociados al fenómeno.

Las observaciones realizadas por el autor, en la ciudad de México, acusaron una isla de calor comparativamente más intensa: hasta unos 12° . En la elevada altitud de la ciudad de México la pérdida de calor por radiación nocturna en las áreas rurales circundantes es comparativamente mayor, por una parte, y por otra, la escasa ventilación son sin duda factores que ayudan a esta intensificación. En una ciudad europea, París, con un área comparable a la capital mexicana, las diferencias térmicas en un mes de invierno (diciembre) fueron de 2° (2° en la periferia y 4° en el centro) (Dettviller, 1970). En la fig. 3 se muestra la distribución de la temperatura mínima en la ciudad de México el 23 de febrero de 1969.

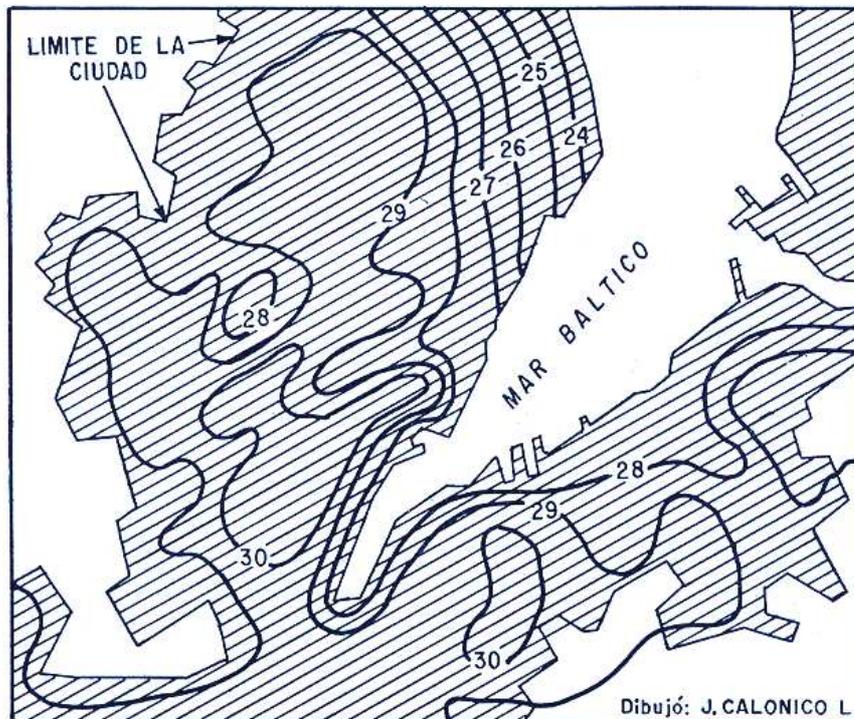


FIG. 2 DISTRIBUCION DE LA TEMPERATURA EN KIEL EL 2 DE JULIO DE 1961 A LAS 14 Hs. (ERIKSEN 1964), EN GRADOS CELSIUS.

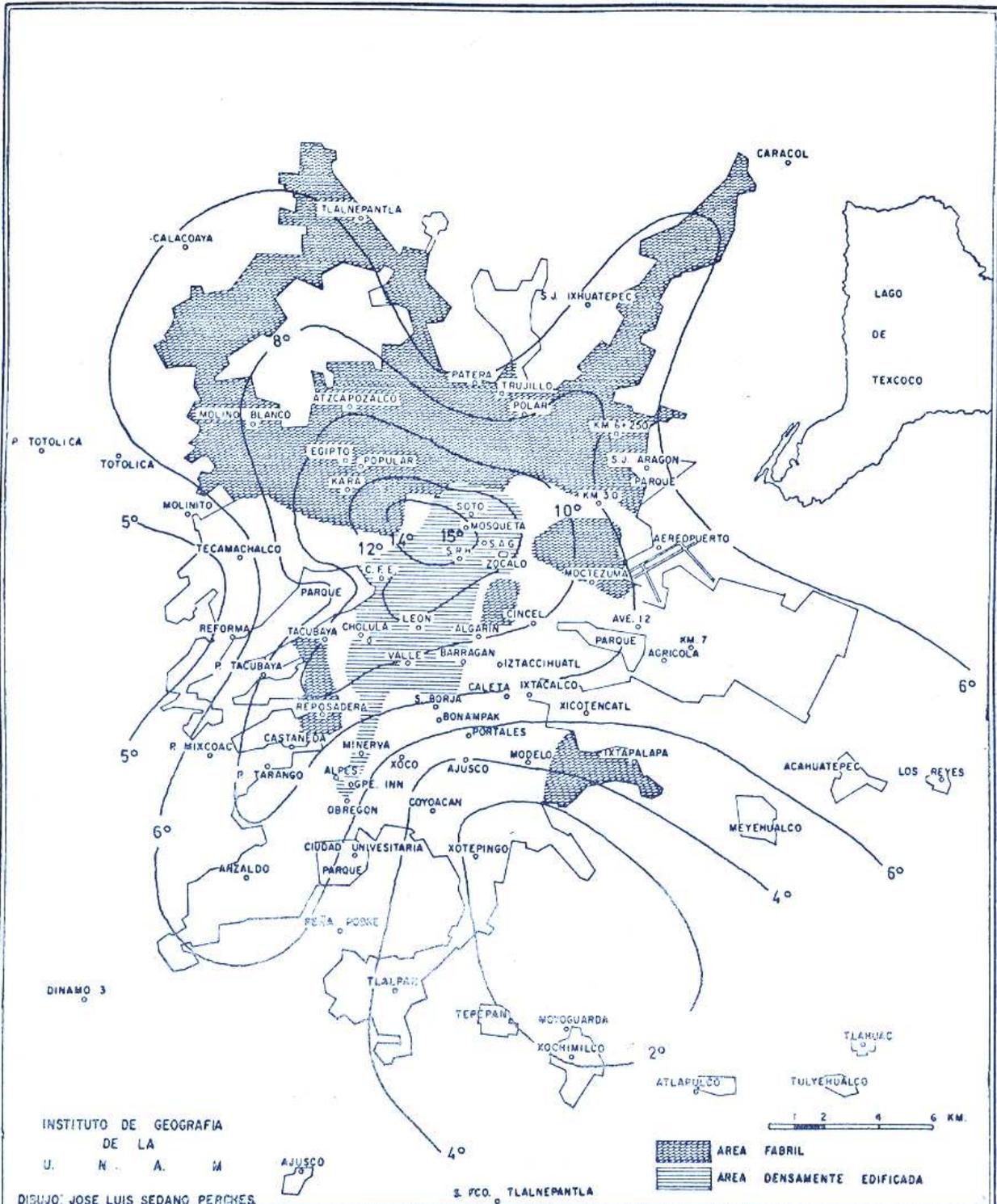


FIG. 3 . DISTRIBUCION DE LA TEMPERATURA MINIMA EN MEXICO D.F. EL 23 DE FEB. DE 1969 .

III. LA BRUMA INDUSTRIAL EN EL ÁREA URBANA

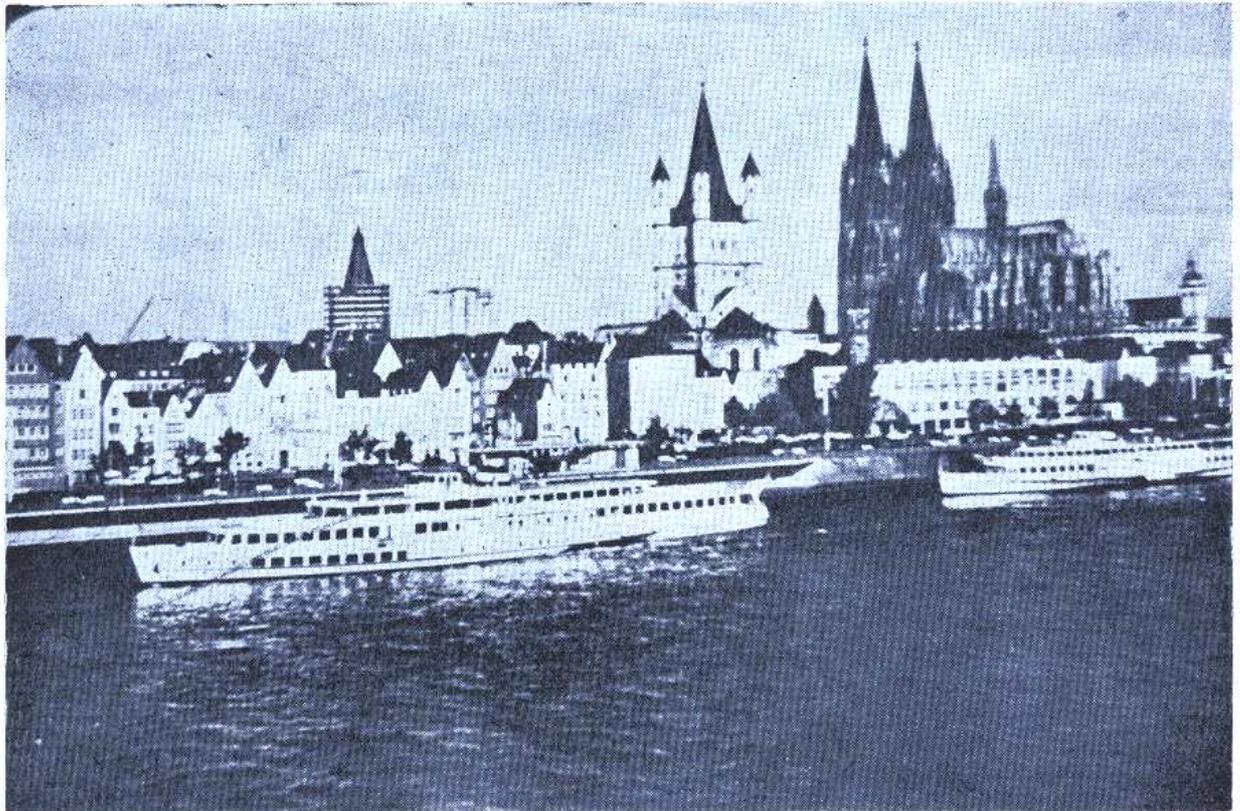
Las investigaciones realizadas recientemente en la República Federal de Alemania, tales como las de H. Georgii (1969) en la ciudad de Mannheim-Ludwigshafen, la de J. Hamm en Stuttgart, Domrös (1966) en Westfalia y otros, muestran la influencia creciente de la contaminación atmosférica en las ciudades alemanas.

Las mediciones hechas por Georgii (1969) señalan que los contaminantes se extienden hasta una altura de 700 metros, sobrepasando rara vez los 1 000 metros, pero frecuentemente exceden de 500 metros. Las elevadas capas de humo, vapor de agua, bióxido de azufre y otros contaminantes, contribuyen al desarrollo de la isla nocturna de calor al absorber y reirradiar la energía procedente de las superficies urbanas.

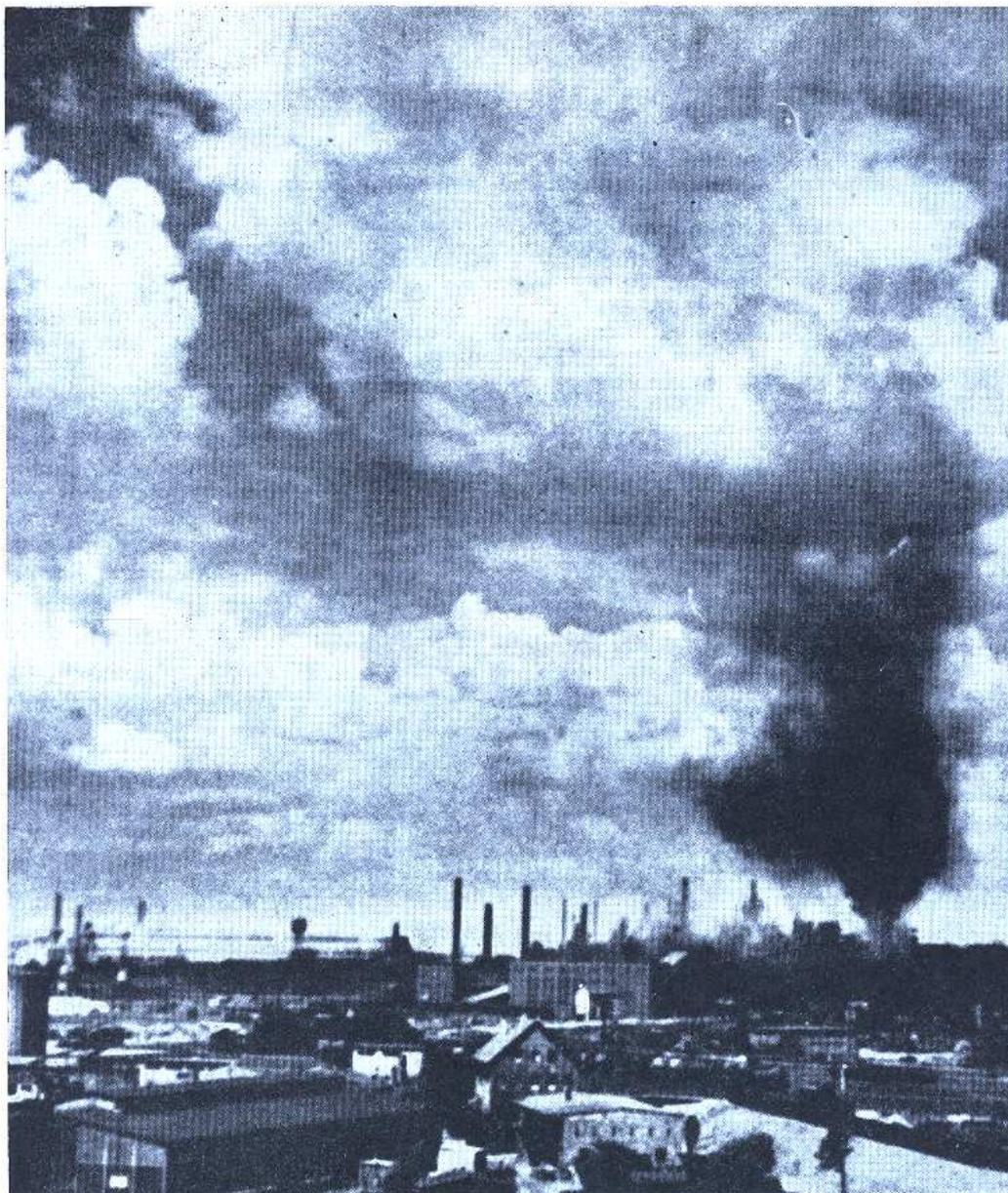
La energía de onda corta recibida en las superficies urbanas se reduce por la absorción

y la dispersión de las capas de bruma urbana. Unas horas después de la salida del sol la capa se eleva y diluye a causa de las corrientes convectivas producidas por la insolación; sin embargo, en las ciudades alemanas, durante la estación fría la insolación es reducida y, en consecuencia, la convección. El autor pudo observar con cierta frecuencia, durante el invierno, la presencia de capas de bruma bastante densas sobre las ciudades industriales de Alemania.

Las mediciones hechas por K. Höschele (1965) durante el período 1961-62 en la ciudad de Karlsruhe revelaron que los niveles de bióxido de azufre tienen su máximo en invierno y su mínimo en el verano; los valores medios variaron entre 0.3 y 0.4 mg/m³; en invierno suben a 0.4 y 0.5 mg/m³. Esta variación estacional se observa también en la ciudad de México (Jáuregui, 1971). Höschele encontró una correlación elevada entre los niveles de SO₂ y la temperatura; cuando ésta bajó a menos de 15° subieron las con-



Catedral de Colonia en la ribera del Rin.



La contaminación atmosférica en la región industrial de la cuenca del Ruhr.

centraciones de bióxido de azufre; lo cual es explicable, puesto que cuando la temperatura del aire desciende por abajo de 15° se enciende la calefacción en multitud de locales de la ciudad.

En un estudio realizado por Guthof y Deimel (1970), las mediciones de SO_2 en seis puntos de Colonia revelaron un decremento de este contaminante a partir del invierno 1962-1963 en que se registró un

máximo de 1.6 a 4.5 mg/m^3 de SO_2 , lo cual, según estos autores, se debe a una menor frecuencia de inversiones de temperatura en Europa central en los años subsiguientes y, por otra parte, a un mejoramiento en la técnica industrial. En otras ciudades, como Karlsruhe, Munich y Francfort se registraron también valores elevados de SO_2 semejantes a los observados en Colonia en el invierno 1962-63, que se caracterizó por una elevada

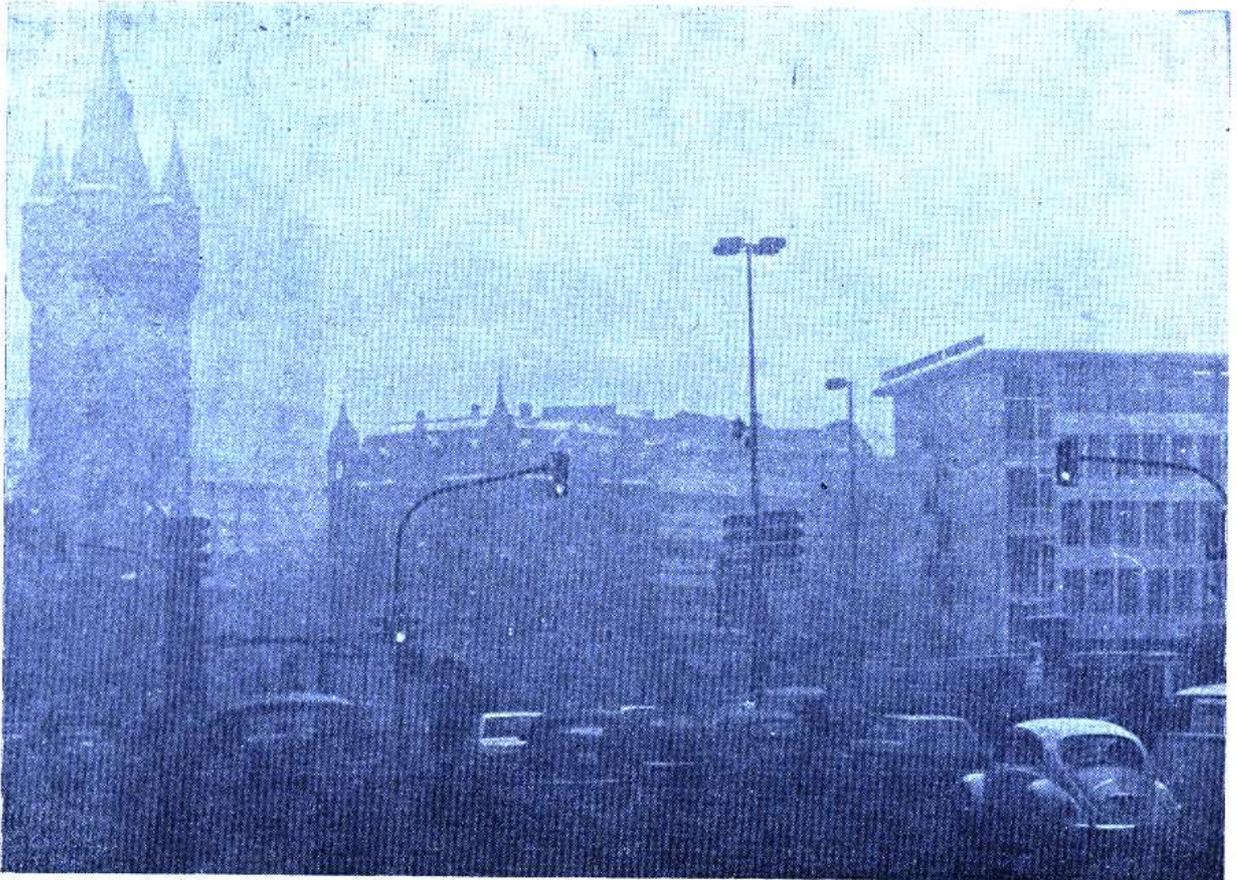
incidencia de situaciones de alta presión barométrica en Alemania, que propician inversiones de temperatura y aire en calma. En esa ocasión se registró en Francfort una concentración de 500 microgr/m³ (0.196 ppm) durante varios días. Sin embargo, según D. Jost (1970) esta situación sinóptica con frecuencia no se prolonga por varios días. Entre marzo y octubre el promedio (de diez años) de ocurrencia es de:

35 veces de 3 a 5 días
15 veces de 5 a 7 días
4 veces de 7 a 10 días

Por otra parte, no siempre que se presenta una situación de alta presión barométrica en Europa central se elevan los niveles de contaminación; así, en 1969, con vientos débiles y una atmósfera estratificada se observaron en

Francfort concentraciones bajas de SO₂ (Jost, 1970). Este autor concluye que una atmósfera estratificada no es condición suficiente para que se eleve la concentración de contaminantes en el aire de la ciudad; pero siempre que la contaminación es alta existe una situación sinóptica anticiclónica. Ya en 1940 F. Linke señalaba que en Alemania el problema de la contaminación del aire está asociado con el 'buen tiempo', es decir, cielo despejado y aire en calma o viento débil; el tiempo nublado está ligado usualmente, en este país (y en Europa en general), con vientos vigorosos y lluvias que acarrearán las impurezas fuera de la ciudad.

Los tipos de tiempo anticiclónico que favorecen las inversiones de temperatura son relativamente poco frecuentes en Alemania (entre un 14 y un 25 por ciento), mientras que los tipos de tiempo nublado o lluvioso



El "smog" oscurece el cielo de la ciudad de Francfort a las 10 de la mañana (Revista *STERN*) del 23 de Julio de 1972

del oeste, suroeste o noroeste tienen en conjunto una frecuencia mayor, como se aprecia en la tabla I.

Como resultado de la mayor frecuencia de depresiones extratropicales y de tipos de tiempo del oeste en general, las ciudades alemanas resultan, por lo común, mejor ventiladas que la ciudad de México, pues los vientos son en promedio más vigorosos que en la capital, como puede apreciarse en la tabla 2 que muestra la variación mensual de la intensidad del viento en la ciudad de Bochum localizada en la región del Rhur y los correspondientes valores para Tacubaya, D. F.

Durante los meses de octubre a abril los vientos en Bochum son, en promedio, bastante vigorosos y decrecen un poco durante el verano; es decir, que en la estación fría

los vientos transportan con más frecuencia los contaminantes hacia fuera de la ciudad que en el verano.

Por otra parte, las lluvias que se reparten casi uniformemente a través del año en Alemania, ayudan a transportar una parte de los contaminantes urbanos hacia el suelo. Como ilustración, en la tabla 3 se muestra la precipitación media mensual en dos ciudades de la región del Rhur. La regularidad de las precipitaciones a través del año en Alemania, asegura una cubierta vegetal y una humedad de los suelos que protege a éstos contra la erosión de los vientos, por lo que el fenómeno de las tolvaneras, tan familiar para los capitalinos durante la estación seca, no se observa en las ciudades alemanas.

Como comparación, en la tabla III se incluye la precipitación en Tacubaya, para des-

Tabla 1
FRECUENCIA DE ALGUNOS TIPOS DE TIEMPO EN EUROPA CENTRAL
(Promedio 1881-1947) (Hess-Brezowsky, 1952)

Tipo de tiempo	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Annual
Anticiclónico	19	19	14	12	14	14	16	16	25	18	18	20	17
Sudoeste	8	8	6	7	6	4	7	7	5	9	10	8	7
Oeste	25	25	27	22	18	24	31	38	25	28	28	33	27
Noroeste	8	9	7	7	8	13	18	14	7	6	9	8	9

Tabla 2
INTENSIDAD MEDIA DEL VIENTO EN BOCHUM (1925-50) (DOMROS, 1966)
Periodo 1925-43, 1948-50, y en Tacubaya D. F. Periodo 1958-63 (en m/s)

Lugar	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Bochum	4.1	4.1	3.7	4.2	3.5	3.2	3.4	3.2	3.2	3.8	3.7	3.9
Tacubaya	0.3	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3

Tabla 3
PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL EN DOS CIUDADES DE LA REGION DEL RHUR
Periodo 1920-50 (Domros, 1966) y en Tacubaya D. F. (m.m)

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Annual
Mulheim	77	59	44	64	67	73	86	97	74	75	64	66	846
Bochum	69	56	44	59	63	72	78	82	64	65	69	60	781
Tacubaya D. F.	13	5	10	20	53	120	170	152	130	51	18	8	750

tacar la influencia que tienen en gran parte del año los tipos de tiempo anticiclónico en la distribución de las lluvias en la capital y que prevalecen de noviembre a abril asociados al paso de un frente polar. Los tipos de tiempo anticiclónico de la estación seca propician, aquí como en Europa central, la estratificación del aire y, en consecuencia, la concentración de contaminante aumenta en el área urbana. Estas invasiones de aire polar producen un descenso de temperatura que usualmente no es muy marcado y que, según un estudio estadístico de estos fenómenos, realizado por J. Hill (1969):

- a. son de corta duración; sólo un 5% dura más de tres días.
- b. están ligados a un frente polar seguido de un largo periodo de tiempo despejado y de aire en calma.
- c. tienen una frecuencia, en la ciudad de México, de uno cada diez días.

En la estación húmeda el tiempo nublado y las lluvias de origen orográfico, o convectivo, o asociadas a las perturbaciones ayudan a reducir los contrastes térmicos entre la ciudad y los suburbios, y la contaminación se reduce consecuentemente.

IV. LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y LA VISIBILIDAD

La intensidad de la radiación solar se reduce en las áreas urbanas debido a la presencia de los contaminantes. Si se toma el factor de turbiedad de Linke (1942) T , como un indicador de la contaminación debida a la dispersión de Raleigh (a_R), a la absorción del vapor de agua (W_{aw}) y a la extinción de la radiación por las partículas en suspensión (S_{as}), se tiene:

$$T = \frac{a_R + S_{as} + W_{aw}}{a_R}$$

T es igual a uno en una atmósfera de Raleigh pura, y los valores crecientes señalan mayor cantidad de sustancias que reducen la radiación solar directa y difusa.

Las mediciones de turbiedad de Linke, que menciona H. Georgii (1969) y que fueron realizadas en la ciudad de Viena, muestran un aumento de 3 en los suburbios, a 8 en el centro de la ciudad. Las observaciones de este factor de turbiedad de Linke, en Londres y Helsinki, acusan reducción considerable de la radiación solar en Kew (Londres) según se puede apreciar en la tabla 4 en la que a manera de comparación aparecen también los valores de este factor, observados por G. Galindo (1962), para la ciudad de México. Según este índice, si la turbiedad del aire de Londres es mayor que en Helsinki, en la ciudad de México ésta es aún mayor.

Georgii y Hoffmann (1966) han determinado la correlación entre la acumulación de SO_2 y la visibilidad en las ciudades alemanas de Gelsenkirchen y Hamburgo; los resultados muestran que en situaciones de:

- a) una inversión de temperatura y
 - b) velocidades de viento menores de 3 m/s
- se encontró que, en un 80 por ciento de los casos de concentraciones excesivas de SO_2 se observaron visibilidades menores de 5 km y en un 50 por ciento de los casos, visibilidades menores de un km. Existe, pues, una correlación estrecha entre la contaminación del aire y el elemento meteorológico denominado 'visibilidad'.

En un intento por determinar la presencia creciente de contaminantes en el aire urbano de la ciudad de México, el autor (Jáuregui, 1958) examinó la variación sufrida por la visibilidad en la capital, en un periodo de

Tabla 4
FACTOR DE TURBIEDAD DE LINKE EN TRES CIUDADES

	<i>inv.</i>	<i>prim.</i>	<i>ver.</i>	<i>otoño</i>	<i>año</i>
Helsinki	2.2	2.9	3.2	2.4	2.7
Kew (Londres)	4.1	4.9	5.1	4.5	4.6
México, D. F.	4.4	6.0	6.5	5.5	5.7

más de 25 años, encontrando que ha decrecido, por promedio, de unos 15 km que usualmente se observan en la década de los años treinta, a unos 4 a 6 km al finalizar la década de los años sesenta. Las visibilidades menores de 5 km son ahora hasta un 50% más frecuentes en la ciudad de México que hace cuarenta años, lo que, de acuerdo con los resultados de Georgii, indicaría que en gran parte del tiempo las concentraciones de SO_2 son excesivas en el aire de la capital.

V. EL VIENTO URBANO

La isla de calor urbano induce un sistema de circulación de vientos que sólo se observan cuando la circulación sinóptica es muy débil y el aire es estable. Los vientos que se originan por la isla de calor en Francfort, en noches despejadas, son del orden de 2 a 4 m/s según Georgii (1970); dicho autor observó que con un viento geostrófico de 3 a 4 m/s se impide la formación del sistema local de viento urbano. La circulación solenoidal producida por el calentamiento diferencial entre la ciudad y el campo es semejante a la brisa, pues existe también un contraste

de masa y uno térmico. La energía potencial disponible se convierte en energía calórica al elevarse las masas de aire tibio y al descender el aire frío, estableciéndose, así, una baja térmica y una convergencia horizontal. La divergencia horizontal se localiza en el área de enfriamiento, es decir, en la periferia. (Stern y Malkus, 1953).

Si la circulación inducida por la isla de calor puede actuar en cierta medida como un ventilador del aire urbano, por la dilución producida por las corrientes ascendentes en el centro cuando no hay viento, cuando éste alcanza cierta velocidad desplaza la circulación hacia viento abajo y las corrientes descendentes de la periferia se desalojan a las partes del centro de la ciudad, impidiendo la mezcla o la dispersión de contaminantes en la vertical. Vukovich (1971) señala que durante la tarde, cuando las velocidades verticales son mayores, la circulación de la isla de calor podría ayudar a desarrollar las nubes convectivas y también a ventilar la ciudad, siempre que el viento sinóptico no sea muy fuerte.

En la ciudad de México, el autor ha encontrado que, con vientos de 4 a 6 m/s se destruye la isla de calor definida por la diferencia de temperaturas entre un punto en el

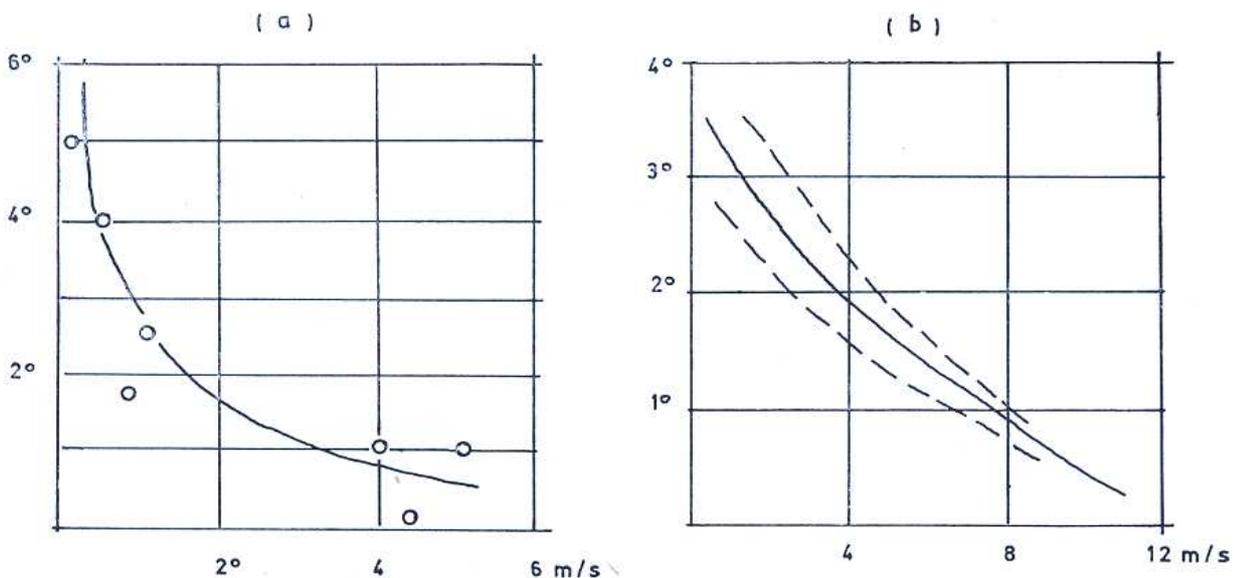


FIG. 4. VARIACION DE LA INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR SEGUN LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN a) MEXICO D.F. Y b) PARIS (DETTVILLER, 1970).

centro (calle de Tacuba No. 7) y otro en la periferia (Tacubaya). Sin embargo, en ocasiones la isla de calor no ha desaparecido aun con intensidades de 6 m/s, dependiendo también de la dirección del viento. En la ciudad de París, cuya extensión es semejante a la de la capital mexicana, Dettviller (1970) ha observado un resultado semejante (fig. 4).

VI. LA VENTILACIÓN

La intensidad del viento se altera por el cambio en la rugosidad del suelo que presenta la ciudad. Georgii (1970) muestra un caso para la ciudad de Francfort, con vientos más débiles en el centro. En la ciudad de México se observa el mismo fenómeno. En la tabla V se puede apreciar que en la estación climatológica del Proyecto Texcoco, fuera del área urbana y al noreste de la ciudad, la intensidad del viento es, en promedio, mayor que en el observatorio de Tacubaya que se encuentra, todavía, dentro del área urbana.

La distribución de los contaminantes y su dispersión dependen de la dirección y de la intensidad del viento. Las mediciones sistemáticas de CO₂ emitido por los vehículos en la ciudad de Francfort, realizadas por Georgii (1967) y colaboradores, revelaron una correlación significativa entre la ventilación de las calles y la velocidad del viento. Así, cuando el viento fue menos de 2 m/s la ventilación fue muy pobre y la concentración de CO y CO₂ aumentó considerablemente cerca del suelo. La ventilación completa y dispersión de los contaminantes se logró cuando el viento fue mayor de 5 m/s en la mencionada ciudad de Francfort. En el puerto

de Kiel, Eriksen (1964) observó que los vientos vigorosos tienden a rodear la ciudad, decreciendo de unos 8 m/s en la zona de muelles abierta al mar, a sólo 1 m/s en el centro.

La disminución de la intensidad del viento está usualmente ligada, como ya se mencionó, a los tipos de tiempo anticiclónicos que con frecuencia traen consigo, además, inversiones de temperatura caracterizadas por una estratificación de las capas de aire superficial. Estas inversiones, que durante la noche son más marcadas fuera que dentro del área urbana, restringen la dilución hacia arriba, de contaminantes, en el aire urbano. Para el sur de Alemania, H. Herb (1964) estima que las situaciones de alta presión que producen inversiones superficiales intensas, tienen una ocurrencia de 62 días durante la estación fría.

En la tabla 6 aparece la frecuencia mensual de las inversiones superficiales en Munich, para el periodo 1953-60 y, como comparación en la ciudad de México, para el muy corto periodo disponible de agosto de 1971 a julio de 1972. (Las observaciones matutinas de radiosondeo se iniciaron en la capital, a partir del mes de agosto de 1971).

En Munich la ocurrencia de inversiones fluctúa sólo ligeramente durante el año, siendo algo más frecuentes a fines del verano; ahí usualmente no predomina un solo tipo de tiempo (ya sea anticiclónico y seco o ciclónico y húmedo) por largos periodos, como lo refleja la regularidad de las lluvias. En cambio, en la ciudad de México, a pesar de lo corto de la información, se advierte ya un contraste acentuado entre la frecuencia de las inversiones en los meses de lluvia (agosto, septiembre y aun octubre), cuando la hume-

Tabla 5

INTENSIDAD DEL VIENTO (en m/s) FUERA (Proyecto Texcoco) Y DENTRO (Tacubaya) DEL ÁREA URBANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO (Promedio de varios años)

Estación	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Proyecto Texcoco	2	2	4	3	3	2	2	2	2	2	1	2
Tacubaya	0.3	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3

Tabla 6

FRECUENCIA DE INVERSIONES SUPERFICIALES EN MUNICH (1953-60) (Herb, 1964) Y EN LA CIUDAD DE MÉXICO

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Munich	16	18	21	18	21	19	21	23	23	21	13	16
México, D. F.	21	25	23	27	18	5	2	5	9	9	14	19

dad de las capas superficiales reduce la posibilidad de su formación, y los meses de secas, cuando persisten los tipos de tiempo anticiclónico, caracterizados por aire más seco y cielos despejados que intensifican la estratificación del aire.

¿Qué profundidad tienen, usualmente, estas inversiones de temperatura? En la tabla 7 se puede apreciar que las inversiones cuya cima se encuentra entre los 201 m y 400 m son las más frecuentes en ambas ciudades, lo cual concuerda con los resultados obtenidos para otras ciudades.

La intensidad más frecuente de estas inversiones en México fue de 1° y 2° habiéndose observado un valor máximo de 4°. J. M. Hamm señala que la altura de las inversiones en la ciudad de Stuttgart varía usualmente entre 300 y 400 m y que en ocasiones la intensidad de éstas ha sido de 8°. Cuando las inversiones persistieron varios días en dicha ciudad, como ocurrió entre el 17 y el 22 de enero de 1966, Hamm observó un aumento de la concentración de SO₂ de 0.1 mg/m³ al principio del periodo, a 0.3 mg/m³ el día 21.

Para tener una idea del grado de contaminación del aire en las áreas urbanas de Alemania, en la tabla 8 aparecen los valores medios de SO₂ en diversas ciudades alema-

nas y, como comparación, en la ciudad de México. Las localidades de la región industrial del Rhur muestran los valores más elevados de SO₂, mientras que la concentración media de este contaminante en la capital mexicana resulta relativamente baja, aunque hay que advertir que este promedio corresponde a los años de 1967-68, siendo, quizá, en la actualidad más elevados. Además, los valores máximos por día en México son tan altos, o más, que en la región del Rhur.

VII. LA ISLA DE CALOR Y LA PRECIPITACIÓN

Varios autores, como A. Kratzer (1956) y H. Landberg (1956), señalan que las áreas urbanas producen condiciones que ayudan a iniciar o intensificar las tormentas. Se mencionan en la literatura tres factores que inducen cambios en la precipitación en el área urbana:

- Mayor número de núcleos de condensación que produce la ciudad, por la combustión.
- Mayor turbulencia debida al aumento de la rugosidad de la superficie urbana.
- Convección térmica originada por las temperaturas más altas.

Tabla 7

FRECUENCIA DE INVERSIONES DE DIVERSA PROFUNDIDAD EN MUNICH (periodo 1953-64) (Herb, 1964) y en México D. F. (agosto-diciembre 1971) (en %)

Altura de la inversión (m)	Munich	México D. F.
0-100	25	17
101-200	25	34
201-400	30	38
más de 400	20	11

Tabla 8
 PROMEDIO ANUAL DE SO₂ EN ALGUNAS
 CIUDADES DE ALEMANIA
 Lahmann y Col, 1967) y en México D. F.
 (en microgr/m³)

Lugar	Prom. anual	Máximo
Stuttgart	70	380
Manheim	140	510
Ludwigshafen	120	400
Colonia	160	460
Dusseldorf	160	460
Dortmund	230	580
Bochum	230	600
Druisburg	230	610
Essen	230	640
Oberhausen	260	720
México D. F.	140	700

Algunos autores como Atkinson (1970) creen que la contribución de la turbulencia y de la contaminación a la formación de tormentas en la ciudad es pequeña. Por otra parte, se ha demostrado que algunos de los contaminantes producidos por la combustión de la gasolina son núcleos potenciales de condensación (Schaeffer, 1966; Morgan y Allee, 1968), pero, como advierte Atkinson, sólo cuando estos núcleos son acarreados hasta gran altura por las corrientes ascendentes se vuelven núcleos potenciales y, aun así, si la nube tiene contenido bajo de vapor de agua, un aumento de los núcleos de condensación resulta en una inhibición del proceso de coalescencia, reduciéndose las posibilidades de precipitación.

Otras investigaciones realizadas en diversos países sugieren, también, que la contaminación del aire en el área urbana induce mayor cantidad de lluvia. Así, el climatólogo francés Dettviller (1970) encontró que llueve más (de 14 a 32%) en París durante los días laborables que en los fines de semana. En los Estados Unidos, S. A. Changon (1968) llega a la conclusión de que en la ciudad de La Porte, Indiana, situada a 50 km viento abajo de Chicago, ocurren, en promedio, 38% más de días con tormentas que en los alrededores. En Alemania, H. Emonds (1954) observó que en Bonn llueve más intensamente que en la periferia. W. Eriksen (1964) ha

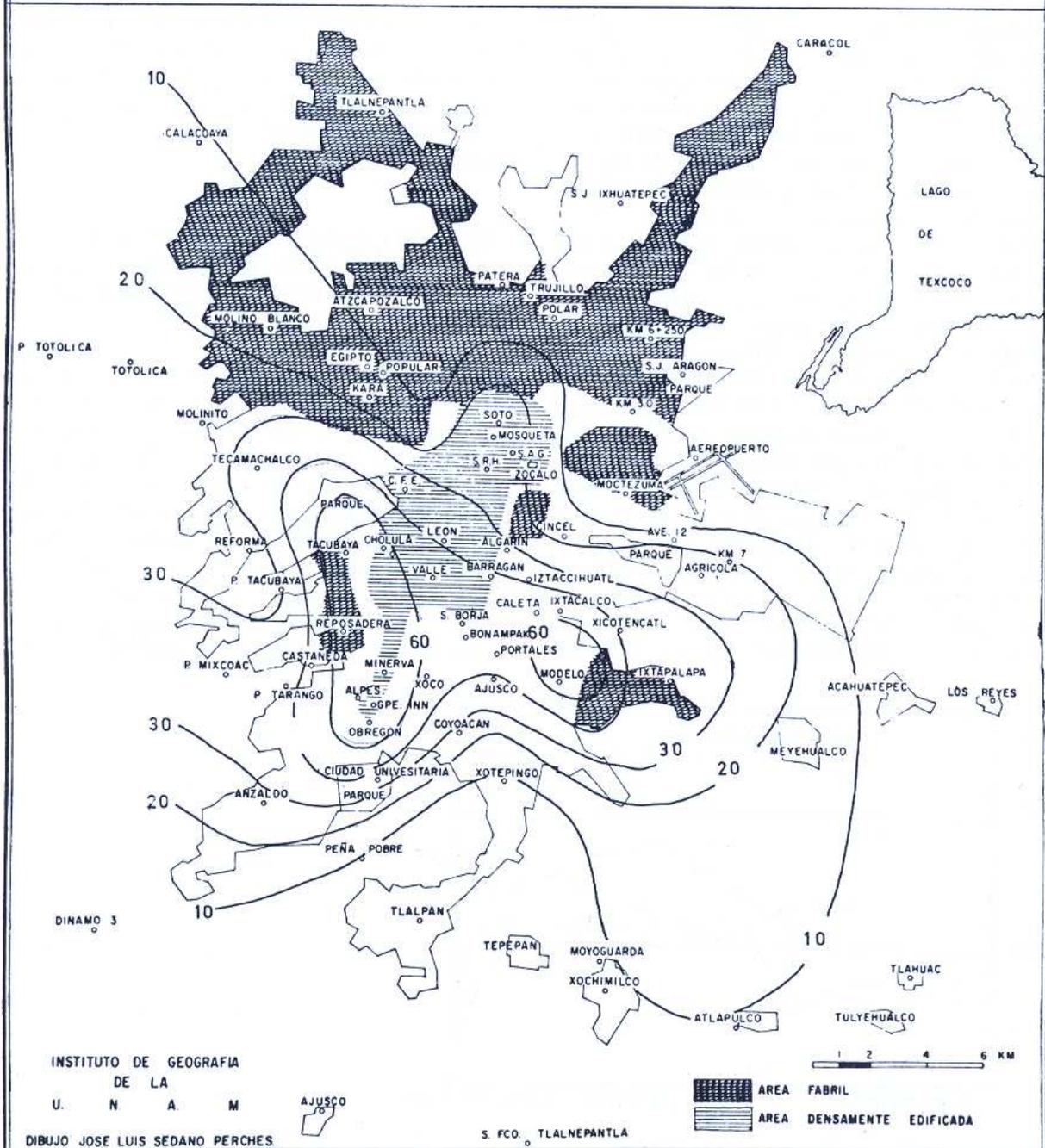
analizado el incremento de lluvia que se observa en el puerto de Kiel en relación con el tipo de tiempo (Grosswetterlage) prevaliente y encuentra que dichos aumentos varían de un 8% en el otoño a un 11% entre el invierno y el verano.

En el análisis de las tormentas que ocurrieron en Londres el 21 de agosto de 1959, Atkinson (1970) llega a la conclusión de que las mayores temperaturas de la ciudad de Londres actúan como una fuente localizada de convección, y en esa ocasión la intensidad de la lluvia fue bastante mayor en el centro de Londres que en la periferia.

Al analizar la distribución de la intensidad de la lluvia en la ciudad de México, el autor ha observado que frecuentemente se acusa un máximo valor, a veces en el centro de la ciudad y en otras ocasiones desplazado hacia el sur o hacia el oeste. Como ilustración de este fenómeno, en la fig. 5 se muestra la distribución de la lluvia (en 24 hs) producida por la tormenta que se abatió sobre la ciudad el 30 de agosto de 1971, cuyas intensidades mayores se observaron hacia el sur y poniente, es decir, viento abajo de la corriente de los alisios húmedos del noreste que prevalecen en esa temporada.

A los tres factores mencionados arriba, que inducen cambios en la precipitación urbana, habrá que agregar, para el caso de la ciudad de México, un cuarto factor que es el levantamiento orográfico que experimenta el aire en las áreas poniente y sur de la ciudad. En algunos casos, la combinación de varios de estos factores produce precipitaciones extraordinarias como la tormenta registrada el 3 de mayo de 1972 que tuvo su mayor intensidad en el área sur de la capital. En esa ocasión se observó poco después de iniciada la tormenta una fuerte precipitación en forma de granizo, lo que señala lo vigoroso de las corrientes convectivas ascendentes reforzadas, muy probablemente, por los factores antes mencionados. La violencia del meteoro fue tal, que por los riachuelos del sur de la capital, antes secos, comenzó a correr el agua con gran fuerza arrastrando árboles y animales. Las laderas del sur quedaron cubiertas de granizo. Las poblaciones que sufrieron más daño fueron los pueblos de Petlcalco, La Magdalena, San Miguel y Topilejo, que se encuentran en los flancos de la serranía que

FIG. 5. DISTRIBUCION DE LA LLUVIA (en mm) EN MEXICO DF EL 30 DE AGOSTO DE 1971.



limita por el sur el valle de México; pero también los bordes meridionales del área urbana de la capital, tales como Tlalpan, Xochimilco y la colonia Isidro Fabela, de Coyoacán, resultaron afectadas. Según los informes periodísticos el número de muertos ascendió a más de 16 personas.

En la fig. 6 se muestra la variación de la intensidad de la lluvia observada por H. Emonds en la ciudad de Bonn, en el año 1952. De acuerdo con sus resultados, en el centro de Bonn llueve por promedio en una estación del año, hasta un 18 por ciento más que en los suburbios. En la ciudad de México esta relación es mayor, pudiendo alcanzar en tormentas individuales, como la del 30 de agosto de 1971, a más de un 300 por ciento. Desde luego, el mayor tamaño de la capital mexicana (unas veinte veces mayor) y la radiación solar relativamente más intensa recibida en la ciudad de México, debido a su latitud y altura sobre el nivel del mar, explican esta diferencia entre las dos ciudades; de modo que la mayor cantidad de energía calórica almacenada por edificios y pavimentos de la capital se encuentra disponible para intensificar las corrientes convectivas.

El calentamiento diferencial entre la ciudad y el campo vecino da por resultado el establecimiento de un área de baja presión barométrica (baja térmica) sobre el centro de la ciudad, originándose, así, un flujo de

aire convergente horizontal. Al examinar el origen de la tormenta que se abatió sobre Londres el 21 de agosto de 1959, Atkinson (1970) encontró valores de la convergencia horizontal hasta de $28 \times 10^{-5} \text{ seg}^{-1}$, que consideró elevados. En la ciudad de México esta convergencia puede ser aún mayor, como es el caso de un día de la época de lluvias; el 30 de agosto de 1970 a las 14 horas la divergencia alcanzó un valor de $44 \times 10^{-5} \text{ seg}^{-1}$ calculada a partir de las observaciones de viento superficial en tres puntos de la ciudad: Tacubaya, Ciudad Universitaria y Aeropuerto Internacional.

VIII. REGLAMENTACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN LA REPÚBLICA FEDERAL DE ALEMANIA

Desde hace algún tiempo se ha comenzado a tomar diversas medidas para controlar las emisiones de contaminantes en la atmósfera, primero en forma aislada y, finalmente, mediante una reglamentación a nivel estatal y federal. Ya en 1948, por ejemplo, las autoridades municipales de la ciudad de Munich habían iniciado un programa de muestreo para determinar el grado de contaminación del aire. En la actualidad la ciudad cuenta con una red de 7 estaciones de medición de SO_2 ,

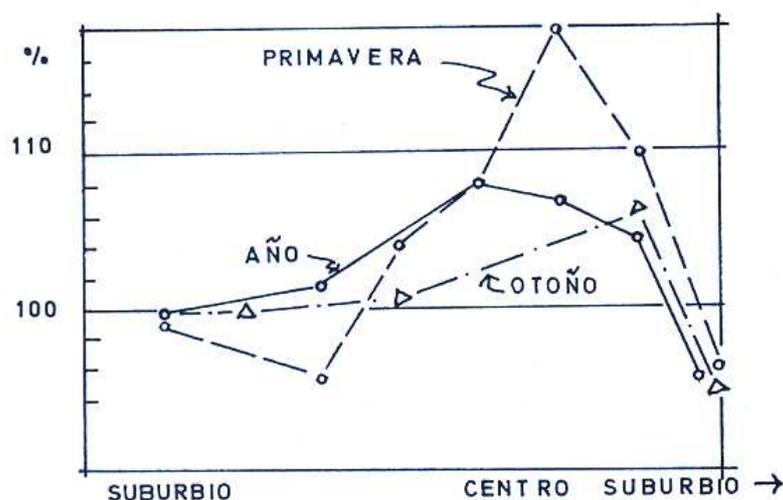


FIG. 6. VARIACION DE LA INTENSIDAD DE LA LLUVIA EN BONN (EMONDS 1954).

polvo sedimentado y otros parámetros meteorológicos; esta información es transmitida en forma automática a un centro de evaluación y los resultados se calculan por medio de computadoras. En Berlín existe una red semejante de observaciones sistemáticas, a partir del año de 1950, en 120 puntos estacionarios.

En 1959 se promulgó un reglamento para enmendar el código industrial; según éste, deben obtenerse permisos para la construcción de plantas que produzcan desechos que afecten la salud, y existe una lista de ellas en el reglamento de 1960. La ley de 1965 (Bundesgesetzblatt I, 22 mai 1965, Nr. 21 pp. 413-415) que se relaciona con la pureza del aire, establece que el Ministerio de Salubridad debe tomar muestras de la naturaleza y calidad de dos gases que contaminan la atmósfera y, además, proveer la base para prevenir y abatir la contaminación. Este Ministerio también debe hacer recomendaciones a las autoridades competentes y éstas deben informar anualmente al Bundestag y al Bundesrat acerca del estado y desarrollo de la contaminación atmosférica dentro de sus jurisdicciones.

El estado de Rhin del Norte-Westfalia, en 1962 aprobó una ley relacionada con la contaminación (Gesetz und Verordnungsblatt für das Land Nordrhein-Westfalen, 15 Mai 1962, Teil A, No. 31, pp. 225-227). En esta provincia se encuentra gran parte de la industria del país.

La ley de 1962 no es de carácter técnico, y comprende establecimientos industriales, o que no lo sean, que produzcan contaminantes atmosféricos, ruido o vibraciones, y la contaminación atmosférica está ahí definida como "cualquier modificación de la composición natural del aire por medio de la introducción de humo, polvo, gas, olores o vapores". Cualquier persona que se encargue del funcionamiento de tales establecimientos deberá instalar, operar y mantener la planta en tal forma, que proteja el área vecina contra la insalubridad del aire (Lanteri, 1972).

Conocedor de que el principal contribuyente de la contaminación del aire es el cada día mayor número de automóviles en las ciudades del país, el gobierno alemán se ha fijado la meta de reducir, para 1980, a un décimo los gases de combustión que salen por los escapes. Asimismo, la ley expedida el 6

de agosto de 1971 establece que, para 1972, la gasolina no deberá tener una cantidad mayor de 0.4 g/l de plomo y para 1976 se habrá reducido a 0.15 g/l. Actualmente, el gobierno alemán se esfuerza porque las medidas para restringir las emisiones de los vehículos sean adoptadas por todos los países del Mercado Común Europeo.

IX. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se hace una descripción de las investigaciones de climatología urbana en Alemania, las cuales se iniciaron formalmente en la década de los años treinta. Estos estudios revelaron, ya, que el tejido urbano altera diversos factores climáticos tales como la radiación solar, la temperatura, la visibilidad, la humedad relativa, la circulación de los vientos y la precipitación.

Si bien en estos primeros trabajos se hacía hincapié en la alteración climática originada por la aglomeración de edificios, las investigaciones recientes se orientan hacia el efecto producido por la contaminación del aire ciudadano.

Las alteraciones climáticas que se observan en las ciudades alemanas se registran, desde luego, también en la ciudad de México, mostrando, sin embargo, ciertos rasgos locales que son el resultado de factores tales como la latitud, altitud y topografía de la capital mexicana.

Aunque los niveles medios anuales de contaminación (medidos por el contenido de SO_2) se comparan con los que se observan en las ciudades alemanas menos contaminadas, los valores máximos para un día son en México tan altos, o más, que los de las áreas urbanas industriales de la región del Rhur. Los factores climáticos (tales como la persistencia de situaciones anticiclónicas, vientos débiles y estratificación del aire superficial) y topográficos, quizá colocan a la ciudad de México en desventaja con las ciudades alemanas (y de Europa en general) en cuanto a la rápida dispersión de los contaminantes, por lo que, a fin de evitar mayor degradación del aire de la capital, sería deseable que las medidas para el control de emisiones, estipuladas en la ley respectiva del año 1971, se lleven al cabo en corto tiempo.

RECONOCIMIENTO

El autor desea expresar su agradecimiento al Prof. Dr. W. Lauer, director del Instituto de Geografía de la Universidad de Bonn, por sus sugerencias para este trabajo y por la oportu-

nidad que se le otorgó, por medio de una beca de la Fundación Fritz Thyssen, para hacer estudios sobre climatología urbana en Alemania.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atkinson, B. W. (1970) The reality of the urban effect on precipitation, *Urban Climates*, W M O, T. N. 108.
- Budel, A., Wolf, J. (1933) Münchener stadtklimatische Studien, *Zeitschrift für Angewandte Meteor.*, 49, 4-10.
- Chandler, T. J. (1960) Wind as a factor of urban temperatures, *Weather*, 15, 204-211.
- Chandler, T. J. (1962) London's urban climate, *Geogr. Journ.* 127, 279-302.
- Chandler, T. J. (1965) The climate of London, Hutchinson.
- Changnon, S. A. (1968) The La Porte weather, anomaly, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 49, pp. 4-11.
- Dettviller, J. (1970) Incidence possible de l'activité industrielle sur les précipitations à Paris, *Urban climates*, W M O. TN. 108.
- Dettviller, J. (1970) Evolution séculaire du climat de Paris, *Memorial de la Météorologie Nationale*, Paris.
- Domrós, M. (1966) Luftverunreinigung und Stadtklima im Rheinisch-Westfälischen Industriegebiet und ihre Auswirkung auf den Flechtenbewuchs der Bäume, *Geographisches Inst. Univ. Bonn*, Heft. 23.
- Emonds, H. (1954) Das bonner Stadtklima, *Arbeiten zur Rheinischen Landeskunde*, Vol. 7, Bonn, selbstverlag, Geographisches Inst. Univ. Bonn.
- Eriksen, W. (1964) Beiträge zum Stadtklima von Kiel, *Geogr. Inst. Univ. Kiel*, Band 22, Heft 1.
- Georgii, H. W. (1969) The effects of air pollution on urban climates, *Bull. Org. Mond. Santé*, 40, pp. 624-635.
- Georgii, H., Hoffman, L. (1966) *Staub*, 26, 511.
- Georgii, H., Busch, E., Weber, E. (1967) Untersuchung über die zeitliche und räumliche Verteilung der Immissionskonzentration des Kohlenmonoxid in Frankfurt/Main, *Ber. Meteor. Geophys. Inst. Univ. Frankfurt*, No. 11.
- Galindo, I. (1962) La radiación solar en México durante el año Geofísico Internacional. El año Geofísico Internacional en México, *Inst. de Geofísica*, UNAM.
- Geiger, R. (1965) *The climate near the ground*, Harvard Univ. Press.
- Garnett, A. Bach, W. (1965) An estimation of the ratio of artificial heat generation to natural radiation heat in Sheffield, Mo. *Weather Rev.*, Vol. 93-6.
- Guthof, O., Deimel, M. (1970) Die Schwefeldioxid-Belastung des Kölner Stadtgebietes in den Jahren 1964-68, *Staub*, 30, p. 7.
- Hoschele, K. (1965) Ergebnisse von Messungen des SO₂-Gehaltes der Luft in Karlsruhe, *Staub*, 25, pp. 102-111.
- Hamm, J. M. (1969) Untersuchungen zum Stadtklima von Stuttgart, *Tübingen geogr. Studien*, Heft 29.
- Hill, J. (1969) Temperature variability and synoptic cold fronts in the winter climate of Mexico, *Climat. Research Series*, No. 4, McGill Univ. Montreal.
- Hess, P., Brezowsky, H. (1952) *Katalog der Großwetterlagen Europas*, Ber. Deutsch Wetterdienst, U. S. Zone, 33, Bad Kissingen.
- Herb, H. (1964) Inversionen, ein Problem für die Luftreinhaltung, *Staub*, 24.
- Jauregui O. E. (1958) El aumento de la turbiedad del aire en la ciudad de México, *Ing. Hidr. en Mex.* vol. 12 (3).
- Jauregui, O. E. (1969) Aspectos meteorológicos de la contaminación del aire en la ciudad de México, *Ing. Hidr. en Méx.*, vol 23 (1).
- Jauregui, O. E. (1971) *Meso-microclima de la ciudad de México*, Imprenta Universitaria, UNAM.
- Jost, D. (1970) Eine Austauscharme Wetterlage im gebiet von Frankfurt/Main, *Staub*, 30, p. 296.
- Kratzer, A. (1956) *Das Stadtklima*, Braunschweig, F. Vieweg.
- Kalb, M. (1962) Untersuchungen zum Stadtklima von Köln, *Meteorologische Rundschau*, 15, p. 92.
- Lanteri, A. (1972) The law and air pollution control, in *Air pollution control*, W. Strauss (ed), Part II, Wiley Interscience.
- Landsberg, H. (1966) *Air pollution in urban climates*, *Biometeorology*, vol. 2, Pergamon Press.
- Lahmann, E., Morgenstern, W., Grupinski, L. (1967) *Schwefeldioxid-Immissionen im Raum Mannheim/Ludwigshafen*, Schriftenreihe des Vereins

- für Wasser-Boden und Lufthygiene, Berlin-Dahlem. No. 25.
- Linke, F. (1942) Handbuch Geophysik, 8, 239.
- Linke, F. (1942) Das Klima der Grossstadt, in Biologie der Grossstadt, Leipzig, Steinkopff, pp. 75-90.
- Morgan, G. M., Allee, P. A. (1968) The production of potential ice nuclei by gasoline engines, Journ. Appl. Meteor., Lancaster, 7, p. 241.
- Pepler, A. (1927) Das Auto als Hilfsmittel der meteorologischen Forschung, Zeitschrift für angewandte Meteor., 46, p. 305-308.
- Renou, E. (1862) Difference de temperature entre Paris et Choisi-le-Roi, Societé météorologique de France, Annuaire, 10, 105-109.
- Reichel, E. (1933) Ein Beispiel grosser Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Freiland Stationen, Preussisches Meteor. Inst. Bericht 402, p. 72-75.
- Schaeffer, V. (1966) Ice nuclei from automobile exhaust and iodine vapor, Science, Wash. 154, 1555-57.
- Schmidt, W. (1917) Zum Einfluß grosser Städte auf das Klima, Naturwissenschaften, Vol. 30 (5), 494-495.
- Schmidt, W. (1929) Die Verteilung der Minimumtemperaturen in der Frostnacht des 12 Mai 1927 im Gemeindegebiet von Wien, Fortschritte der Landwirtschaft, 2(21), 681-686.
- Stern, M., Malkus, J. (1953) The flow of a stable atmosphere over a heated island, Journ. of Appl. Meteor., Vol. 10(1), feb.
- Stummer, G. (1939) Klimatische Untersuchungen in Frankfurt/Main und seinen Vororten, Ber. Meteor. Geophys. Inst. Univ. Frankfurt, No. 5.
- Vukovich, F. (1971) Theoretical analysis of the effect of mean wind on a heat island circulation characteristic of an urban complex, Mo. Wea. Rev. (99) No. 12., dic.