

**UNA PRIMERA ESTIMACION DEL TRANSPORTE DE SO₂
SOBRE LA CIUDAD DE MEXICO**

E. JAUREGUI*

D. KLAUS**

W. LAUER**

(Recibido: 14 de abril de 1981)

RESUMEN

El análisis de correlación revela que es significativo el grado de dependencia de las concentraciones de SO₂, CO y polvo en suspensión (fracción respiratoria) entre las cuatro estaciones ubicadas en los extremos NW, NE, SW y SE de la ciudad y separadas entre sí más de 4 km.

En el área del centro de la ciudad, la norma de calidad del aire para SO₂ (de 0.10 ppm se excedió en más del 10 % del tiempo en enero de 1976.

Las concentraciones de SO₂ así como la intensidad del viento en cuatro estaciones de la ciudad exhiben una distribución aproximadamente logaritmo-normal.

Se ha aplicado el método de las correlaciones espacio-tiempo para determinar la escala en que se realiza el transporte de los contaminantes atmosféricos sobre la ciudad.

Hay un transporte neto de 24 horas de SO₂ en la dirección Norte-Sur por el Poniente de la ciudad que es detectable hasta en un intervalo de corrimiento de 3 horas en las series horarias del mes de enero de 1976. Otras direcciones preferidas para el transporte de contaminantes por la ciudad en enero son del NE al SW y del SE al NW.

* *Instituto de Geografía, UNAM.*

** *Instituto Geográfico de la Universidad de Bonn, Alemania Federal.*

ABSTRACT

Correlation coefficients for SO_2 , CO and suspended particles between four monitoring stations located in extreme NW, NE, SW and SE corners of Mexico City urban area are found to be significantly high. The air quality standard for SO_2 (0.10 ppm) was exceeded more than 10 % of the time in January 1976.

SO_2 concentrations as well as wind intensity at the same four stations were found to be log-normally distributed for the January data. Space-time correlations between the different stations and at different time-intervals were also studied to establish the transport length scale of SO_2 over the city. A distinct peak of correlation at two-hour interval over the center west of city (Chapultepec Park) indicates a southward flow of contaminants along the foot hills of mountains to the west.

1. INTRODUCCION

Es indudable que la calidad del aire de la ciudad de México ha sufrido un considerable deterioro en las últimas décadas. Sobre la capital se cierne una nube de impurezas producto de la combustión, tales como polvos, óxidos de nitrógeno, bióxido de azufre, sulfatos, etcétera. Los niveles de concentración de los diversos contaminantes exhiben variaciones espaciales y estacionales que, por una parte están relacionados con la distribución e intensidad de las fuentes de emisión y por otra, con algunos factores meteorológicos.

En el presente trabajo se describen brevemente primero los patrones de flujo del aire superficial más frecuentes en la ciudad. Enseguida se examinan las características de las distribuciones de la frecuencia de las concentraciones del SO_2 y del viento superficial con objeto de analizar su grado de semejanza y, consecuentemente, la existencia de una relación estrecha entre dichas variables.

Más adelante se explora el grado de relación espacial entre las concentraciones de SO_2 y otros contaminantes que flotan en la atmósfera citadina con objeto de tener una base que permita hacer extensivos los resultados del transporte observado para el SO_2 a dichos contaminantes (CO, polvo).

Asimismo, se muestra el grado de relación entre los contaminantes atmosféricos y algunos factores meteorológicos. Finalmente, por el método de las autocorrelaciones, se intenta establecer la escala del transporte de polutantes dentro del área urbana por medio de las correlaciones temporales de las concentraciones del gas SO_2 , utilizándolo como representativo de la nube de gases polutantes.

2. EL AREA DE ESTUDIO Y SISTEMAS DE TIEMPO

La ciudad de México se encuentra en la esquina SW del Valle de México, ocupando una extensión de unos 600 kilómetros cuadrados. Las montañas que rodean el Valle se elevan a unos 600 m o más sobre la planicie de éste y, en consecuencia la ciudad queda poco ventilada por los vientos (fig. 1).

Durante el semestre centrado en el invierno el Valle de México se encuentra bajo la influencia de las penetraciones de aire polar en los trópicos (Klaus, 1973; Hill, 1969). Estos anticiclones migratorios producen escasos nublados y lluvias pero al paso del frente se observan vientos de cierta intensidad (3 a 6 m/s) que favorecen la dilución rápida y transporte de los contaminantes atmosféricos hacia fuera de la ciudad por algunas horas (Jáuregui, 1979; Klaus y Jáuregui, 1979). Poco tiempo después del paso frontal predomina el flujo anticiclónico a tiempo que los vientos subsiden en intensidad. Las condiciones de cielo despejado y vientos débiles o en calma que prevalecen después del paso del frente, dan lugar a elevadas concentraciones de las impurezas emitidas por la ciudad.

En el semestre centrado en el verano el aumento de la humedad característica de los alisios, favorece la inestabilidad en la capa planetaria, lo que redundará en una dilución vertical vigorosa de los contaminantes urbanos durante el día. También, las lluvias frecuentes interceptan una parte considerable de la polución aérea.

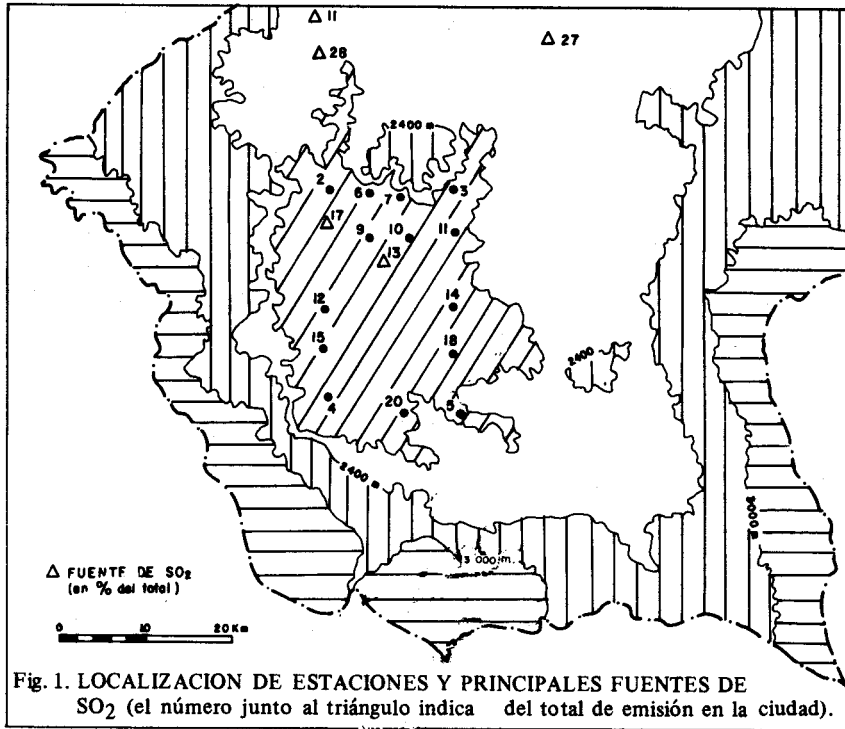
3. LOS DATOS

Se han utilizado los datos horarios de SO_2 , CO y polvo en suspensión¹⁾. Debido a la irregularidad de la información, sólo se pudieron usar valores del mes de enero de 1976, por lo que los resultados obtenidos sólo representan las condiciones medias del transporte durante la estación seca. Asimismo, se emplearon los datos climatológicos correspondientes recopilados de los archivos del Servicio Meteorológico Nacional de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

La red automática de muestreo del aire en la ciudad de México consta de monitores de:

- a) Polvo en suspensión (Philips PW 9790) cuyo principio de medición es la absorción de radiación beta.

¹⁾ Los autores agradecen a las autoridades de la Subsecretaría del Mejoramiento del Ambiente y del Servicio Meteorológico Nacional por las facilidades otorgadas para obtener los datos.



- b) Monitores de SO₂ (Philips PW 9700/00) que funcionan por titulación coulométrica con bromo.
- c) Monitores de CO (Philips PW 9775/00) de conversión de CO a CO₂; después reacción de CO₂ en orden para liberar yodo y, finalmente titulación continua con bromo.

Se obtuvieron también los datos climatológicos correspondientes de temperatura, humedad, dirección y fuerza del viento.

La distribución de las estaciones se muestra en la figura 1. Las estaciones ubicadas en las cuatro esquinas de la red son también estaciones meteorológicas (estaciones 2, 3, 4 y 5) que registran el viento, la temperatura y la humedad.

Es sabido que las principales fuentes de contaminación por gases (CO, NO e hidrocarburos) provienen de los vehículos de motor que circulan en la ciudad de México (1.6 millones aproximadamente en 1977 según estimaciones de la S.S.A. Me-

morándum técnico SMA/DGS At/04-78). En cuanto a las fuentes fijas las principales se ubican al norte del centro geométrico de la ciudad (refinería, plantas termoeléctricas, fundiciones, cementeras), donde se encuentra la mayor densidad de estaciones de muestreo. La red tiene forma rectangular de 14 x 20 km aproximadamente comprendiendo un área urbana de 280 km². En el aeropuerto, al NE de la ciudad, se encuentra la estación de radiosondeo donde se hacen dos observaciones diarias.

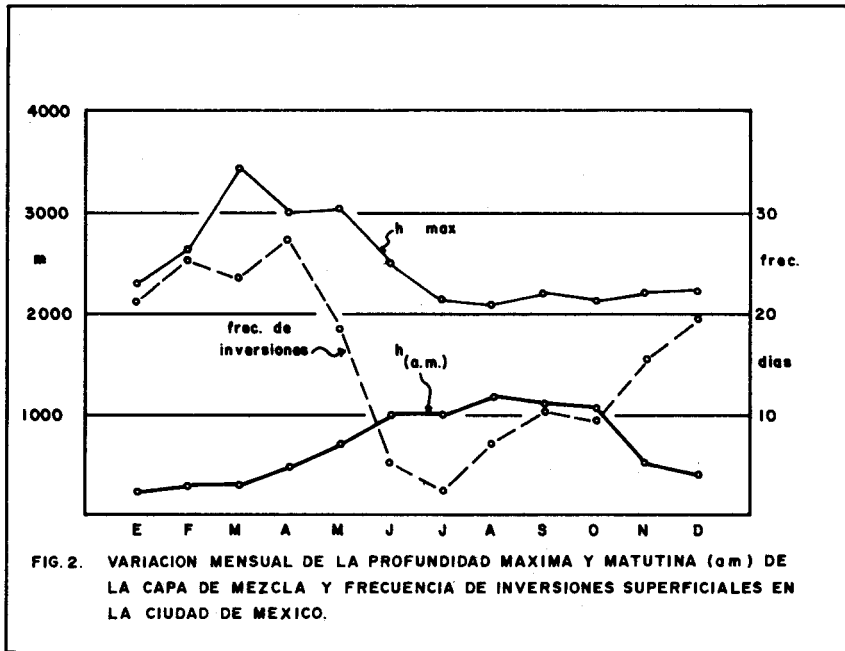
4. EL FLUJO DEL AIRE SUPERFICIAL

La localización de la ciudad de México en un área montañosa da origen a patrones de flujo necesariamente complicados. Por otra parte, el aire que llega al área urbana se vuelve más turbulento a medida que cruza por la ciudad. El patrón de flujo resultante se deberá a la interacción de la circulación local (vientos de valle y de montaña) con el flujo del aire a escala regional que se deriva del gradiente barométrico. Los patrones de flujo de aire más simples son aquellos en que domina claramente una de las dos circulaciones: los vientos locales o los vientos regionales (Jáuregui, 1979). Entre estos dos casos extremos de flujo superficial del aire cabe una gran variedad de situaciones intermedias, cuyos rasgos dependerán del grado de prevalencia, ya sea de la circulación local o la impuesta por el gradiente regional de presión.

Es fácil comprender que la distribución espacial de los contaminantes que flotan en la ciudad, en un determinado día dependerá del patrón de flujo del aire superficial que prevalezca entonces. Es decir, si por ejemplo, el patrón de flujo es el típico del paso de un frente (vientos de 2 a 4 m/s soplando de la misma dirección en toda la ciudad) es casi seguro que los niveles de concentración de contaminantes se abatirán drásticamente, por dilución y transporte, resultando en un debilitamiento del gradiente de las líneas de isoconcentraciones. En otro trabajo (Klaus y Jáuregui, 1979) se examinan algunos de estos casos por el método de los eigenectores.

5. LA CAPA DE MEZCLA

En la fig. 2 se muestra la variación mensual de la capa de mezcla para el aeropuerto situado en el borde NE de la ciudad. Al estimar la profundidad de la capa de mezcla (PCM) de la mañana se ha considerado un aumento de 5° respecto a la temperatura del aire superficial dada en el sondeo de las 6 a. m. Esto significa que la PCM estimada en esta forma corresponde a las 9 ó 10 de la mañana. A esas horas las diferencias de temperatura entre el centro de la ciudad y el aeropuerto podrían ser de 1 ó 2 grados. En todo caso si el contraste térmico ciudad/campo fuera mayor, la PCM que aparece en la fig. 2, para la mañana, correspondería a una hora más tem-

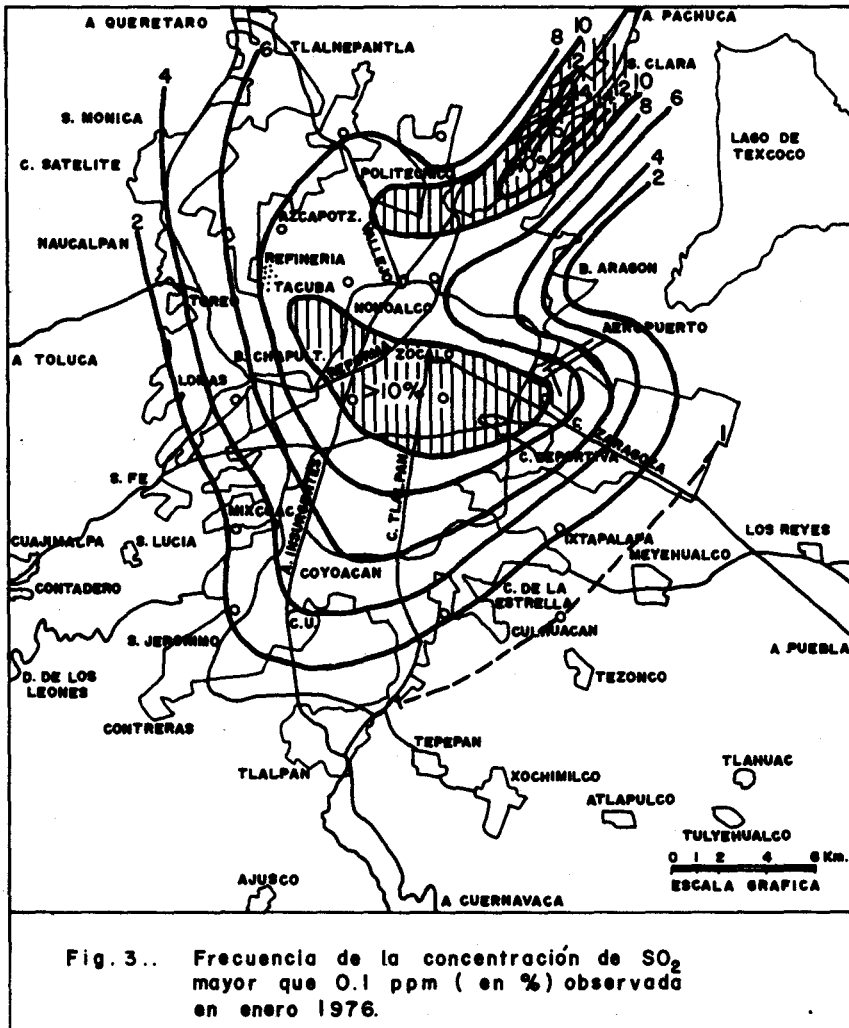


prana que las 9 a. m. Lo que se advierte es que a dichas horas la PCM es menor de 500 m de noviembre a abril y es de alrededor de 1 000 m en la estación lluviosa. Esto significa que a la restricción lateral del aire debida a la convergencia de flujo horizontal y que es más acentuada en los meses secos, se agrega la limitación de dilución de impurezas en la vertical, debida a una capa de mezclado poco profunda en las mañanas de invierno, que se caracteriza además, por una alta incidencia de inversiones superficiales según puede apreciarse también en la fig. 2. Esta capa de aire frío se comienza a calentar de abajo hacia arriba por asoleamiento y generalmente desaparece poco antes del mediodía estableciéndose un gradiente térmico vertical cercano al adiabático seco, en toda la profundidad de la capa de mezclado que, a la hora de mayor temperatura superficial, alcanza su altura máxima, es decir, poco después del mediodía. La abundante energía solar disponible para quemar la inversión en los meses de secas, explica el repentino crecimiento de la capa de mezcla después del mediodía, alcanzándose profundidades de mezclado de más de 2 000 m según se aprecia en la misma fig. 2. Durante la estación lluviosa, al disminuir la frecuencia e intensidad de las inversiones superficiales, se profundiza (a unos 1 000 m, fig 2) la capa de mezcla en la mañana, lo que significa un mayor volumen disponible para la dilución de las impurezas en esta época. Si bien en la estación de lluvias los factores meteorológicos (mayor profundidad de la PCM matutina, menor

frecuencia de inversiones, efecto de lavado por la lluvia) favorecen en general la dilución, es raro que en dicha temporada se abatan notablemente los niveles de concentración en el transcurso de unas horas por la acción de 'barrido' de vientos vigorosos, como ocurre con el paso de una masa de aire polar en el invierno.

6. FRECUENCIA DE VALORES MAXIMOS DE SO_2

Las variaciones diurnas y estacionales de uno de los gases que flotan en el aire de la ciudad (el SO_2) se han descrito ya en otros trabajos (Klaus y Jáuregui, 1979; Jáu-



regui, 1979). En ocasiones interesa saber, como una forma de estimar la calidad del aire, cuántas veces en un mes o en un año, los niveles de concentración de un determinado contaminante sobrepasan un cierto valor, que se considera elevado y cuya alta incidencia es indeseable o quizá aun podría implicar cierto riesgo para la salud.

En la fig. 3 se muestra la distribución de frecuencia de los valores horarios de SO_2 mayores de 0.1 ppm. Este valor es el máximo horario permitido en algunos reglamentos de normas de calidad del aire como el que está vigente en Japón (Shikata, 1978). En las áreas del centro de la ciudad y en el NE se excede la norma mencionada en más de un 10 % del tiempo (hasta 15 %). Como ya se vio en otro trabajo (Klaus y Jáuregui, 1979), estas máximas concentraciones ocurren principalmente a las horas de la mañana en que el pico de tránsito coincide con la disolución gradual de la inversión térmica superficial.

7. ANALISIS DE CORRELACION ENTRE ALGUNOS CONTAMINANTES DEL AIRE Y LOS FACTORES METEOROLOGICOS

En la actualidad existen numerosos estudios en los que se utilizan los métodos de correlación múltiple para intentar determinar el grado de dependencia de las concentraciones de contaminantes urbanos con variables meteorológicas (Turner, 1961; Hoschele, 1965). Todavía no se llevan a cabo en la ciudad de México experimentos con gas trazador para determinar los movimientos de los contaminantes en los diversos puntos del área urbana. Hasta ahora ha sido difícil establecer en qué medida son acarreados los contaminantes de un lugar a otro de la ciudad, si se toma en cuenta que a medida que el gas viaja, se diluye significativamente, o cambia su concentración por depósito o por reacción con otros gases. Si bien el análisis de correlación no demuestra relaciones de causalidad, sí ayuda a dar una interpretación razonable, tanto del transporte de los diversos contaminantes, como de la interrelación entre ellos.

a) *Distribución de la frecuencia de las concentraciones de SO_2*

Desde hace tiempo se sabe que las concentraciones de contaminantes se distribuyen logaritmo-normalmente en las áreas urbanas (Larsen, 1965). Según esta representación, el logaritmo de la concentración se grafica contra la frecuencia de los casos en que dicha concentración es excedida. Si los puntos resultantes se alinean según una recta aproximadamente, entonces se dice que la concentración del contaminante está distribuida logaritmo-normalmente. La distribución queda definida por la pendiente y por el punto 50 percentil (el promedio geométrico).

La fig. 4a muestra que las distribuciones del SO_2 para cinco estaciones de muestreo (una en el centro: estación 9, y cuatro en el perímetro: estaciones 2, 3, 4 y 5) están alineadas sensiblemente en una recta. El promedio geométrico de las distribuciones varía: para las estaciones 9 y 3 (al N de la ciudad) es casi el mismo, lo mismo que para las estaciones 4 y 5 en el Sur. La estación 2 en el NW, tiene un promedio geométrico intermedio de los anteriores.

Cuando es alta la correlación entre la concentración y el viento, Knox y Lange (1974) han sugerido que la distribución de la frecuencia del viento determina la concentración relativa χ/Q del contaminante.

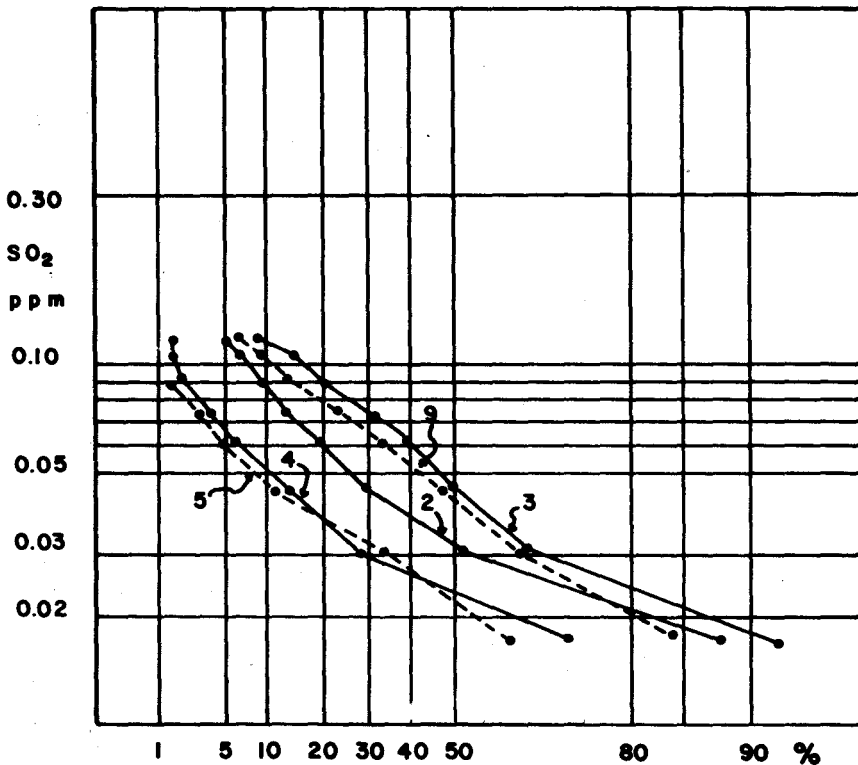


FIG. 4a DISTRIBUCION DEL SO_2

En el caso de la ciudad de México parece ser que la distribución de la intensidad del viento es también logaritmo-normal, según puede verse en la fig. 4b construida con los datos de enero de 1976, donde se aprecia que el promedio geométrico de las estaciones 3 y 5 es muy semejante, mientras que el de las estaciones 2 y 4 difiere considerablemente de los anteriores.

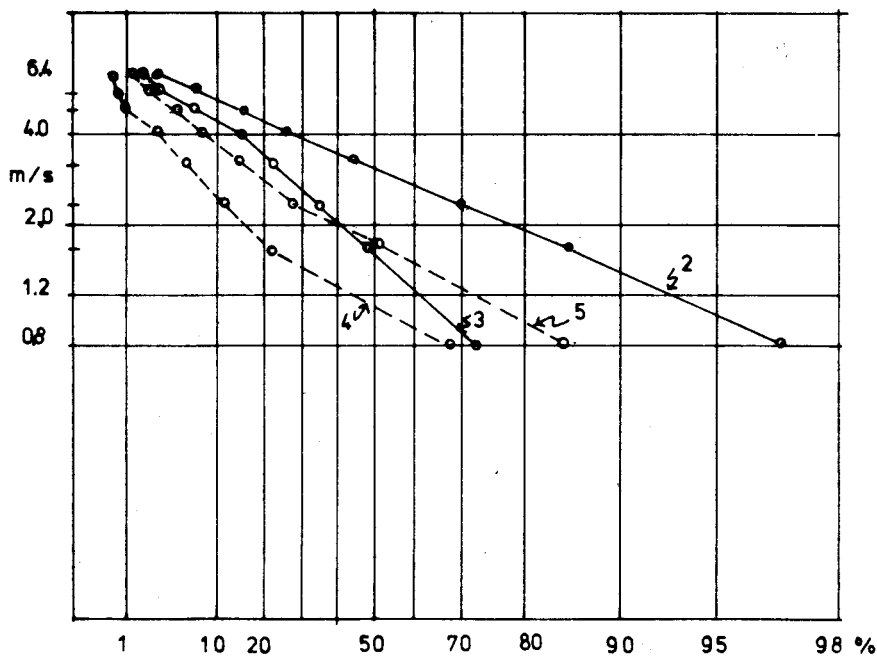


FIG. 4b. DISTRIBUCION DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

b) Las correlaciones

Se utilizaron los datos horarios de SO_2 , CO, polvo (fracción respiratoria), temperatura, humedad y viento de las observaciones correspondientes a enero de 1976. Se utilizó el análisis de regresión lineal. Los pares de valores horarios para estimar las correlaciones variaron entre 350 y 550, por lo que los coeficientes de correlación son significativos arriba del 95 % de confianza, cuando éstos son mayores de 0.108. Sólo excepcionalmente los valores de las correlaciones calculadas resultaron menores que dicho valor.

La tabla 1 muestra los coeficientes de correlación entre las concentraciones horarias de SO_2 de cuatro estaciones ubicadas en las esquinas de la red.

Tabla 1

Coefficientes de correlación entre las concentraciones de SO₂ de cuatro estaciones (estaciones 2, 3, 4 y 5) (1 % de significancia)

	2	3	4	5
2		0.447	0.455	0.397
3			0.413	0.405
4				0.274

Todos los coeficientes de correlación son significativos al nivel de 1 %; esto sugiere que una parte de los cambios que ocurren en las concentraciones de SO₂ se observan en toda el área de la red al mismo tiempo. Los coeficientes de correlación se calcularon también para otros contaminantes: el CO y el polvo (fracción respiratoria); según puede verse en la tabla 2 todos los coeficientes de correlación entre las concentraciones de CO observadas en las cuatro estaciones son significativamente altos, con excepción del correspondiente a las estaciones 4 y 5 donde la correlación está en el límite del nivel de 5 % de significancia.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Turner (1961). Los coeficientes de correlación de las observaciones de polvo entre las mismas cuatro estaciones resultaron también significativos (al nivel del 1 %). Estos resultados significan que una parte de las variaciones de cada uno de los contaminantes (SO₂, CO y polvo) afectan toda el área urbana de la ciudad de México al mismo tiempo.

Tabla 2

Coefficientes de correlación entre concentraciones de CO y polvo para las estaciones 2, 3, 4 y 5

CO				POLVO			
2	3	4	5	2	3	4	5
2	0.605	0.545	0.317	2	0.482	0.355	0.459
3		0.604	0.356	3		0.232	0.473
4			0.089	4			0.428

c) *Correlaciones entre las concentraciones de SO₂ con otros contaminantes y con algunas variables meteorológicas*

En la tabla 3 puede verse que el SO₂ está altamente correlacionado (al 1 % de significancia) con el CO y con el polvo en las cuatro estaciones de la red localizadas en la periferia, con lo que se justifica en parte el haber utilizado el SO₂ como un gas representativo de la nube de impurezas de la ciudad. Por otro lado, los coeficientes de correlación entre el SO₂ y la humedad resultaron apreciablemente más bajos, siendo la correlación en algunos casos positiva y en otros negativa. La relación inversa en las estaciones 2 y 4 podría explicar en parte el efecto de lavado (rainout). En el caso de la temperatura la correlación resultó a veces positiva y otras negativa, lo que era de esperarse ya que los ciclos diurnos de ambas variables coinciden sólo en parte del tiempo.

El SO₂ y el viento. Con respecto a la intensidad del viento, las concentraciones de SO₂ muestran coeficientes de correlación consistentemente negativos, siendo significativos (al nivel de 1 %). Esta correlación con el viento no resultó tan elevada debido quizá al efecto de un número comparativamente alto de casos en que la intensidad del viento fue débil.

Tabla 3

Coeficientes de correlación entre el SO₂ con variables meteorológicas y otros contaminantes.

Estación	SO ₂	CO	Polvo	Temp.	Hum.	Int. viento
2	SO ₂	0.511	0.623	0.091	-0.082	-0.107
3	SO ₂	0.290	0.444	-0.012	0.019	-0.114
4	SO ₂	0.298	0.389	0.179	-0.171	-0.105
5	SO ₂	0.314	0.207	-0.089	0.135	-0.163

8. CORRELACIONES ESPACIO-TIEMPO DE LAS CONCENTRACIONES DE SO₂ EN LA CIUDAD DE MEXICO

En la sección anterior se vio que los niveles de concentración de SO₂, polvo o CO observados en un punto de la red están relacionados significativamente con los

correspondientes niveles observados simultáneamente en otros puntos de la ciudad. Lo anterior significa que las variaciones de la concentración de cada contaminante de la nube de impurezas, que flota sobre la ciudad, se observan en mayor o menor medida en toda el área urbana que comprende la red de muestreo. Estas variaciones horarias diurnas, estacionales, no son de la misma magnitud; como ya se vio en un trabajo anterior (Jáuregui, 1979) son más acentuadas en la zona centro y NE (donde las concentraciones son mayores en valor absoluto) que hacia la periferia.

EL METODO DE LAS CORRELACIONES ESPACIO-TIEMPO

Supongamos que un cierto contaminante (en este caso usaremos el SO_2) tuviera un tiempo de residencia, dentro del área de la ciudad, suficientemente largo, digamos de 3 a 4 horas. Es decir que con un viento del N de 2 m/s (7 km/hr) una parcela de gas SO_2 tardaría en cruzar la ciudad unas 2 ó 3 horas. Si el viento fuera de sólo 1 m/s como suele ocurrir en la ciudad a temprana hora, el tiempo que tomaría el transporte se duplicaría. Supongamos también, que el gas SO_2 emitido en el borde N de la ciudad no sufriera una dilución apreciable, mientras transcurre por la ciudad, además de no recibir más aportaciones del gas en su trayecto. Finalmente supongamos que prevalece sobre toda la ciudad un patrón muy simple de flujo de viento, que se caracterizara por mantener su intensidad y dirección constante mientras cruza la ciudad. Si las condiciones ideales mencionadas arriba se cumplieran, entonces la correlación entre las concentraciones de SO_2 de dos estaciones, que estuvieran alineadas con la dirección del viento, serían funciones unimodales (con un solo máximo) del intervalo de tiempo que se tomara (una hora, dos horas, etcétera) entre una y otra serie de observaciones de SO_2 . El desplazamiento del pico o valor máximo de la correlación a partir del intervalo de tiempo ($t_2 - t_1 = 0$) podría indicar la ocurrencia de eventos que se mueven de un lugar a otro en la dirección del viento.

Si el intervalo de tiempo ($t_2 - t_1$) en que se desplaza el pico de correlación coincide con el calculado dividiendo la distancia que hay entre los dos puntos de muestreo por la velocidad media (v) observada $\frac{x_2 - x_1}{v}$, siendo v la componente del viento en la dirección $x_2 - x_1$, en el periodo $t_2 - t_1$, entonces es de sospechar que existe un transporte del gas (en este caso el SO_2) debido al viento en la dirección general de $x_2 - x_1$.

El método de autocorrelaciones que hemos descrito ha sido aplicado por Chock y Levitt (1976), para describir el transporte de oxidantes en la cuenca aérea de Los Angeles.

La correlación espacio-tiempo utilizada por dichos autores tiene la forma siguiente:

$$R(x_1, t_1, x_2, t_2) = \frac{\sum_{i=1}^N Ai(x_1, t_1) Ai(x_2, t_2)}{[\sum_{i=1}^N Ai^2(x_1, t_1) \sum_j^N Aj^2(x_2, t_2)]^{1/2}} \quad (1)$$

donde:

$Ai(x_j, t_j)$ – es la desviación de la variable i observada respecto al promedio, en el punto x_j y en el tiempo t_j

N – es el número total de observaciones.

La correlación R se calculó con la fórmula (1) utilizando los valores horarios de SO_2 para el mes de enero de 1976. Primero se calcularon las R entre la estación 2 con el resto de las otras estaciones de la red, después las de la estación 12 y el resto, las de la 4 y el resto, las de la 14 y el resto, etcétera.

El número de pares de las series fueron del orden de 500, de modo que las correlaciones significativas al nivel de 5% deben ser mayores (o menores) que $\pm 2/\sqrt{N}$ o ± 0.09 .

Antes de pasar a examinar los resultados de las correlaciones espacio-tiempo conviene aclarar que, como señalan Chock y Levitt, el efecto de transporte que se puede reflejar en las correlaciones quedará en ocasiones enmascarado por los efectos locales y/o reacciones químicas que se presenten en el transcurso del gas (en este caso el SO_2) por la ciudad. Si los efectos locales son importantes, entonces las correlaciones serán comparativamente bajas y mostrarán poca dependencia de los intervalos de tiempo.

9. RESULTADOS

a) *El transporte de SO_2 de Norte a Sur sobre la ciudad*

En las figs. 5 a 8 se muestra la distribución de las correlaciones calculadas entre la estación 2 situada en la esquina NW del área urbana, con el resto de las estaciones de monitoreo, primero para un tiempo $\Delta t = 0$ (fig. 5). Las correlaciones son altas y significativas en casi toda el área que abarca la red, siendo más altas en toda la longitud de las fajas N y W de la ciudad y, en menor medida, por el borde Sur.

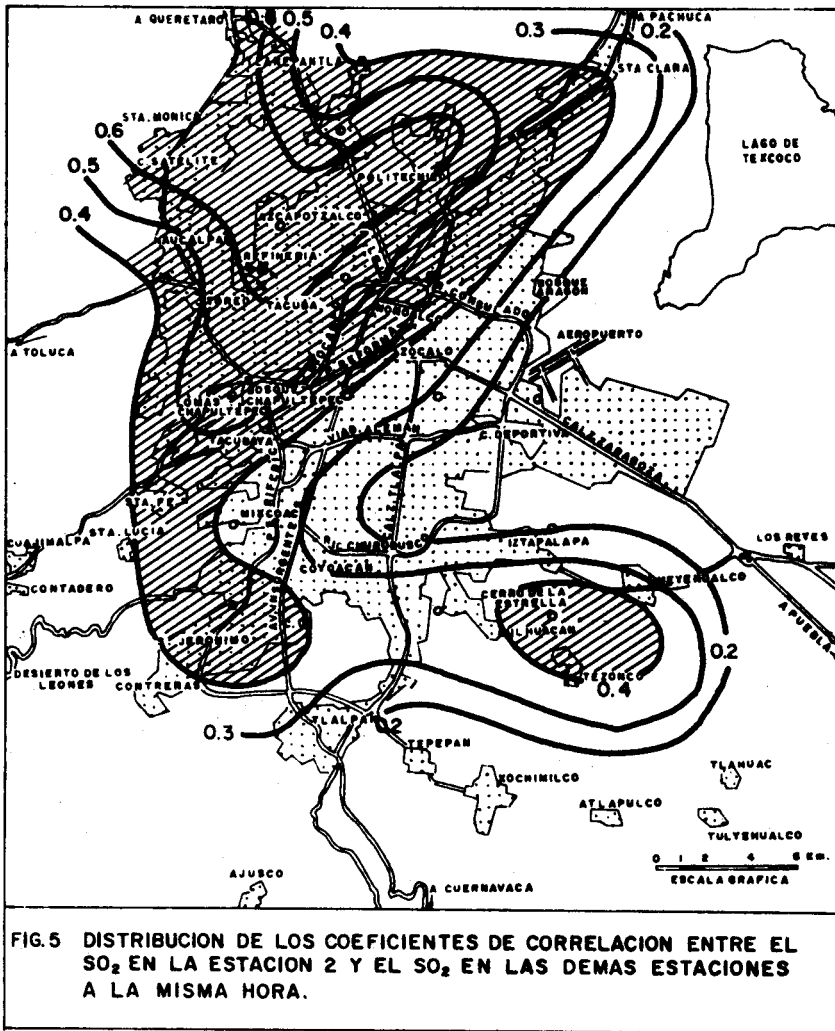


FIG. 5 DISTRIBUCION DE LOS COEFICIENTES DE CORRELACION ENTRE EL SO₂ EN LA ESTACION 2 Y EL SO₂ EN LAS DEMAS ESTACIONES A LA MISMA HORA.

Si el corrimiento de las series horarias de SO_2 es de dos horas (fig. 7) el pico de correlación significativo se desplaza de la estación 2 (en Tlalnepantla) a la estación 12 en Chapultepec manteniéndose correlaciones elevadas hacia la esquina SE de la ciudad. Si dividimos la distancia que separa estas dos estaciones entre las 2 horas del corrimiento se obtiene una velocidad media de poco menos de 2 m/s que es un valor razonable de la componente N-S de la intensidad promedio del viento durante el día. En la misma fig. 7 se advierte que después de 2 horas las correlaciones decrecen hacia el Centro Este de la ciudad. Aún después de 3 horas (fig. 8) el pico de

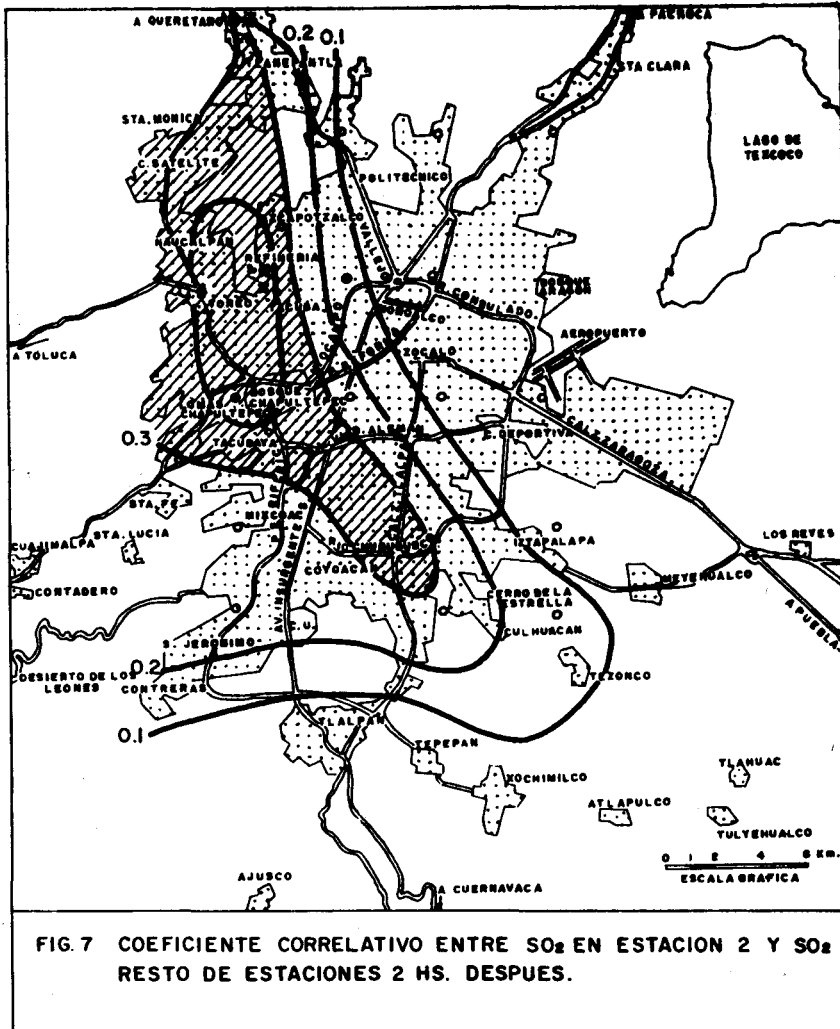
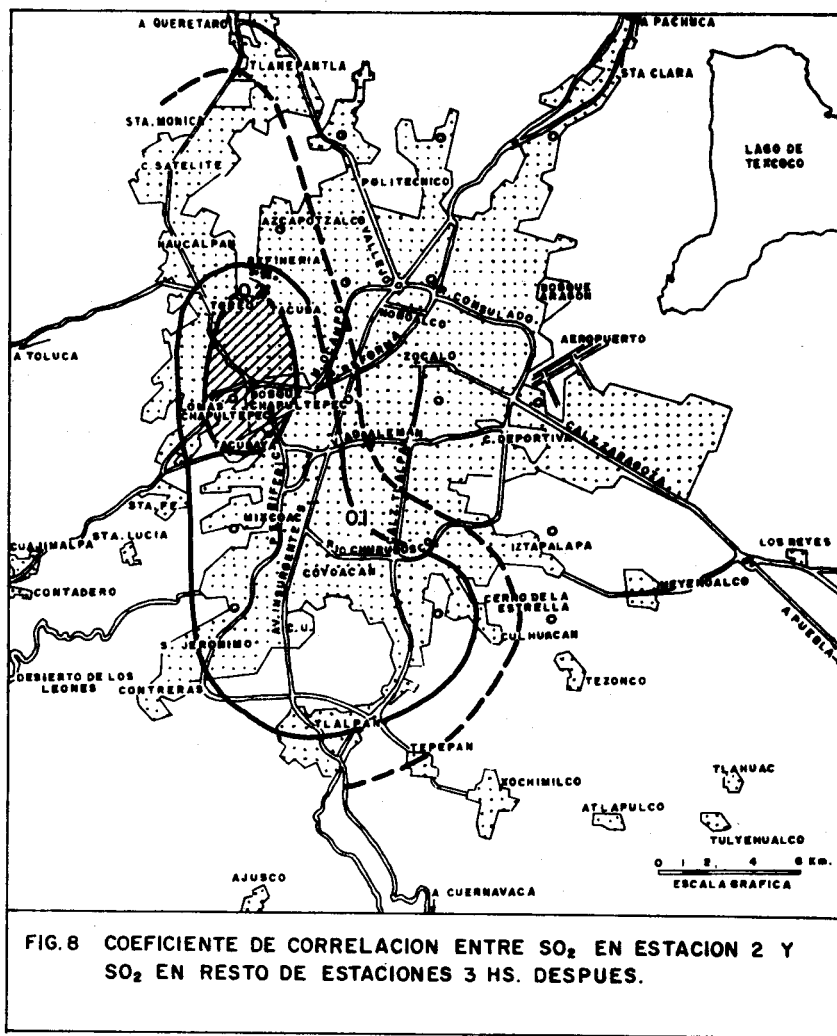


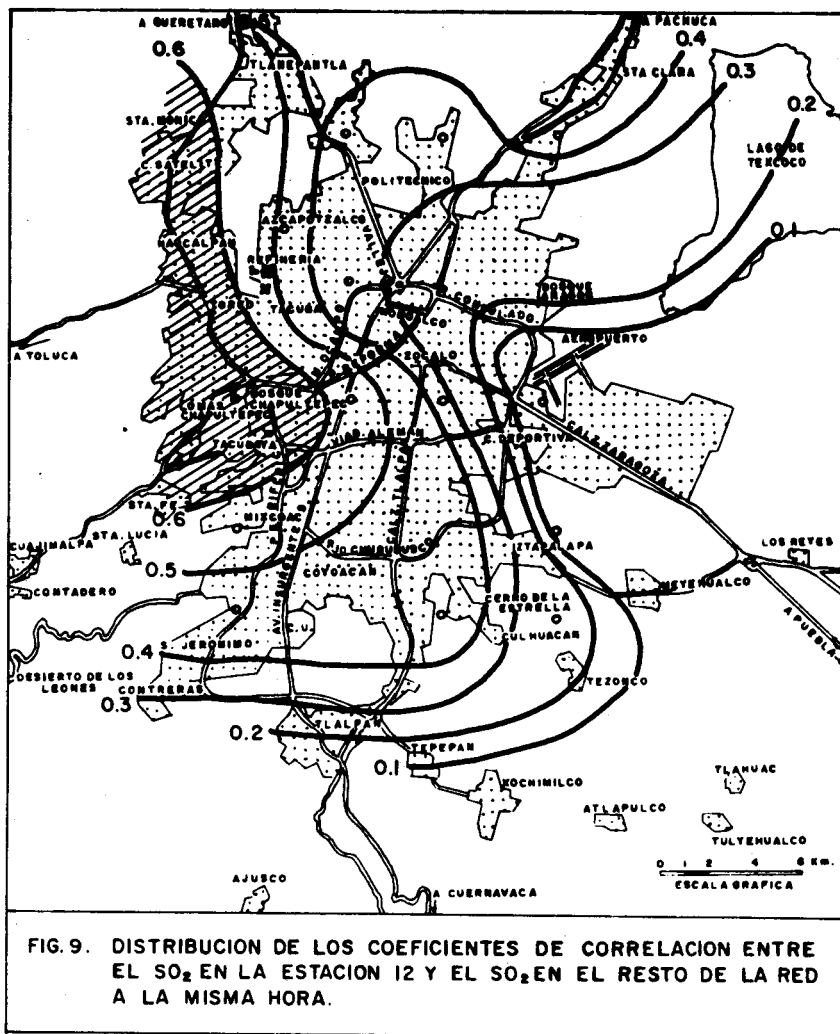
FIG. 7 COEFICIENTE CORRELATIVO ENTRE SO_2 EN ESTACION 2 Y SO_2 RESTO DE ESTACIONES 2 HS. DESPUES.



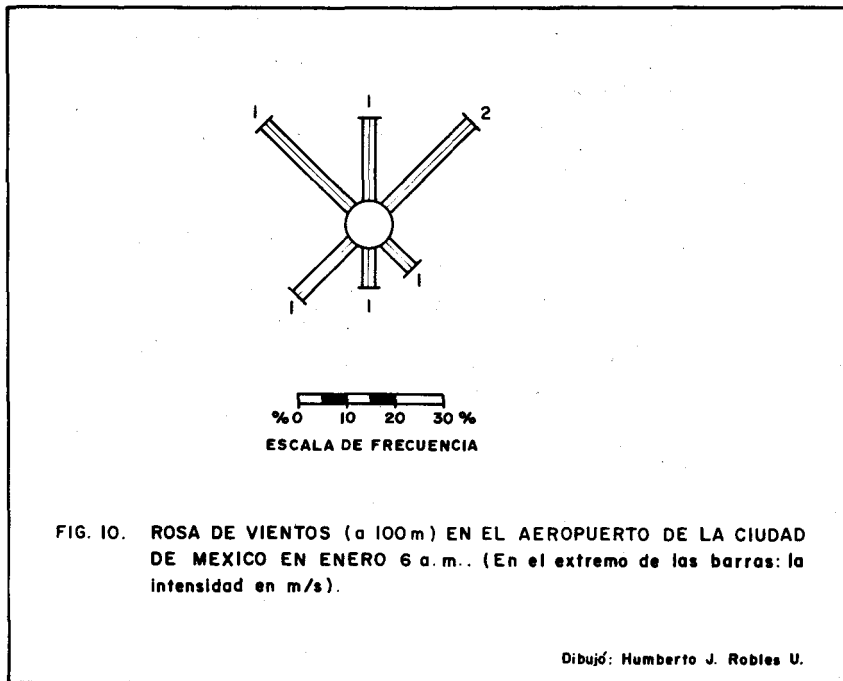
máxima correlación se localiza en la estación de Chapultepec (12), señalando que el transporte de SO₂ que se origina en la esquina NW de la ciudad, en un mes de secas como enero, se translada en promedio hacia el Sur impulsado por los vientos débiles de 1 a 2 m/s por periodos que en promedio son hasta de 3 horas. Más allá de este lapso de 3 horas, no es posible por este método, detectar la trayectoria del transporte, debido por una parte a los efectos locales al Sur del área de Chapultepec y en parte a la dilución que sufre el gas en su trayecto.

b) El transporte de SO_2 en la dirección E-W

En las figs. 9, 11 y 13 se muestran los patrones de correlación de los niveles de SO_2 de la estación 12 de Chapultepec con el resto de las estaciones para diversos corrientes de tiempo. Se advierte que las correlaciones son altas excepto para las estaciones del Centro-Oriente directamente al E de Chapultepec, señalando que las direcciones dominantes en enero, son del NE o del SE (fig. 9), pero no francas del

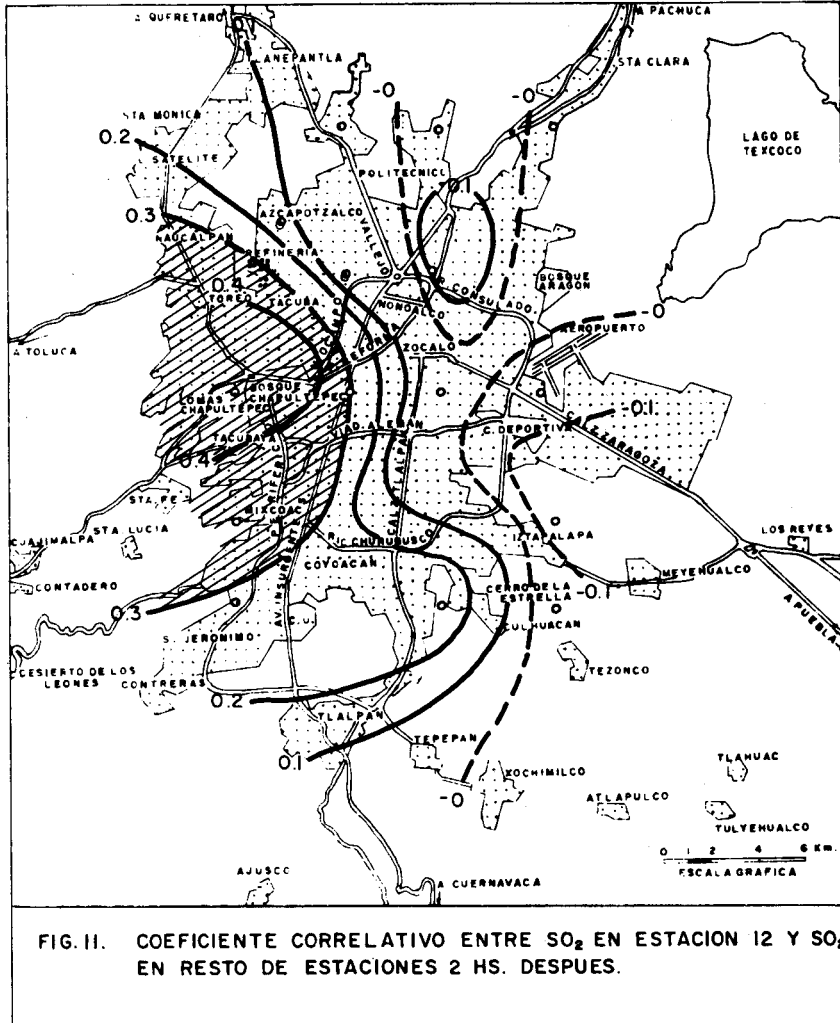


E. En la fig. 10 se muestra la rosa de vientos a un nivel aproximado de 100 m para enero en el aeropuerto de la ciudad de México. La frecuencia acumulada de los vientos NE y SE es de 32%; si a esta frecuencia se le suma la de las direcciones NW y SW se tiene un total de 73%. Es decir, que 2/3 del tiempo en enero los vientos soplan del NE al SW (o viceversa) o del SE al NW (o al contrario). En esta forma se puede explicar el estrechamiento que adopta la distribución de las correlaciones en la parte central de la ciudad y en el sentido E-W, indicando que las correlaciones se mantienen altas a lo largo de los ejes NE-SW y NW-SE que son las direcciones correspondientes a los vientos superficiales más frecuentes. Una hora después, el pa-



trón de distribución de las correlaciones es semejante al de la fig. 9, sólo que los valores son ahora menores. Sin embargo, dos horas después (fig. 11), aparecen en las direcciones NE y SE respecto de la estación Chapultepec dos áreas de correlación significativa de signo negativo, señalando un transporte importante en las direcciones mencionadas. Nuevamente, las distancias que separan a la estación 12 de Chapultepec, de las estaciones 10 y 21 divididas entre las 2 horas del intervalo da valores de la velocidad media del viento entre 1.4 y 1.9 m/s. Estas velocidades se observan frecuentemente en enero en el área urbana de la ciudad de México, según puede apreciarse en la fig. 12 que muestra que la variación media diurna de la intensi-

dad del viento en Tacubaya, es justamente de 1 a 2 m/s. El signo negativo de la correlación implica que el transporte se efectúa de NE a SW o de SE a NW en el lapso de 2 horas.



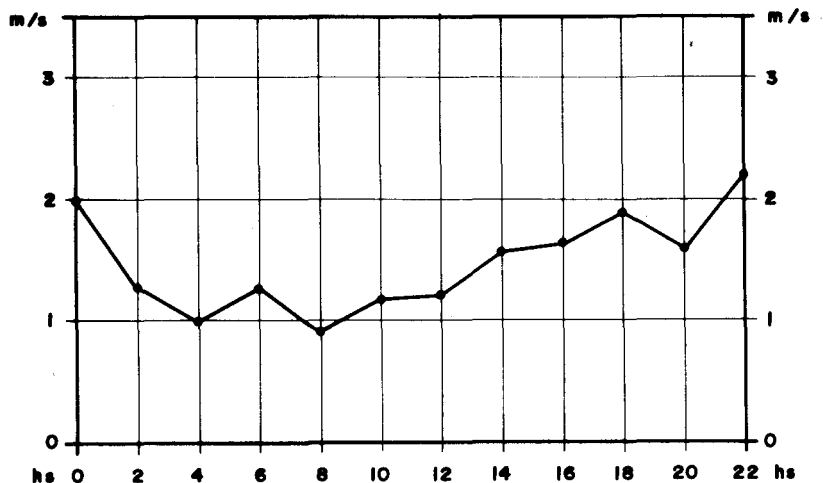


FIG. 12. VARIACION DIURNA DE LA INTENSIDAD DEL VIENTO (m/s) EN TACUBAYA (ENERO).

Dibujó: Humberto J. Robles U.

Si el intervalo de tiempo se aumenta a 3 horas (fig. 13) se mantiene básicamente el mismo patrón de distribución de las correlaciones que para 2 horas, señalando que aún hasta 3 horas después es significativo el transporte de SO_2 en las direcciones mencionadas. Para un lapso de 3 horas la intensidad media del viento estará próxima a 1 m/s que sigue siendo un valor razonable para la ciudad.

Conviene aclarar que en el análisis de las correlaciones espacio-tiempo de las series horarias de SO_2 , el transporte que se deduce de éstas, se realiza en promedio para las horas del día en que prevalece por más tiempo un determinado patrón de circulación de los vientos, principalmente los de carácter local que son los más persistentes. Ya en otra parte se ha examinado el caso del transporte de contaminantes cuando el campo del viento se encuentra perturbado por el paso de un frente frío (Jáuregui, 1979).

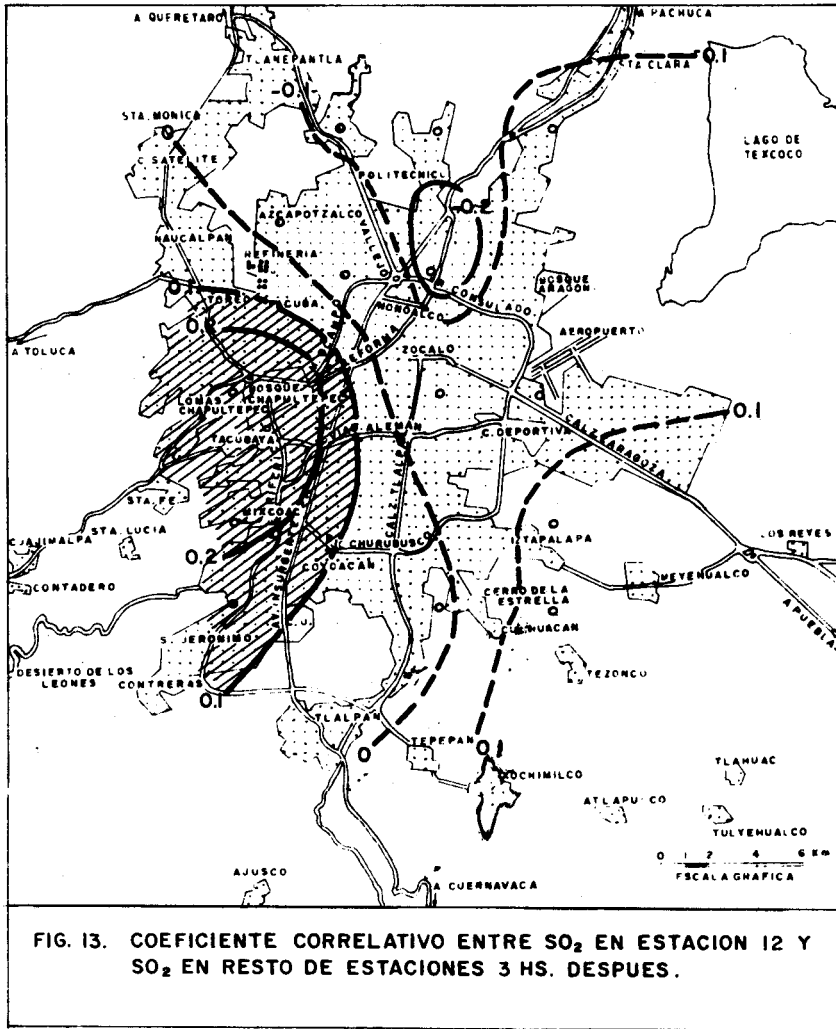


FIG. 13. COEFICIENTE CORRELATIVO ENTRE SO₂ EN ESTACION 12 Y SO₂ EN RESTO DE ESTACIONES 3 HS. DESPUES.

10. CONCLUSIONES.

Se han utilizado las correlaciones de los niveles de concentración de diversos contaminantes (SO₂, CO y polvo en suspensión) entre los diversos puntos de la red de monitoreo que la Subsecretaría del Mejoramiento del Ambiente mantiene en operación, con objeto de determinar el grado de asociación entre las estaciones de la red ubicadas en las 4 esquinas del área urbana (estaciones 2, 3, 4 y 5).

Los resultados muestran que las correlaciones son, en general, altas y significativas entre dichas estaciones, a pesar de que se encuentran separadas más de 12 km entre sí.

Si se considera como referencia la norma de calidad del aire para el SO_2 la correspondiente a 0.10 ppm (Japón), sólo en el área del centro de la ciudad se excedió en más del 10 % del tiempo de dicha norma en enero de 1976.

Tanto las concentraciones de SO_2 como la intensidad del viento en las estaciones 2, 3, 4 y 5 exhiben una distribución logaritmo-normal.

En la segunda parte del trabajo se ha aplicado el método de las correlaciones espacio-tiempo, con objeto de determinar la escala en que se realiza el transporte de los contaminantes atmosféricos sobre la ciudad.

Al calcular las correlaciones espacio-tiempo entre los niveles de SO_2 en una estación del Norte de la ciudad y los correspondientes al resto de la red se ha podido establecer que hay un transporte neto de SO_2 en 24 horas en la dirección Norte-Sur en el Poniente de la ciudad que es detectable en intervalos hasta de 3 horas. Los valores más altos de las correlaciones se desplazan en el lapso de 2 horas desde la zona de Naucalpan hasta Chapultepec (unos 11 km).

El transporte de SO_2 sobre la ciudad en otras direcciones (NE y SE) quedó en evidencia al calcular las correlaciones espacio-tiempo entre la estación Chapultepec y el resto de las estaciones de la red. En estas direcciones el transporte de SO_2 (y presumiblemente de los otros contaminantes) se lleva a cabo en promedio con más lentitud (1 m/s).

RECONOCIMIENTO

El presente trabajo se realizó en Alemania Federal en colaboración con el Instituto Geográfico de la Universidad de Bonn, mediante el apoyo económico de la Fundación Humboldt, otorgado al autor que aparece en primer término. El Lic. Francisco Cruz, colectó, depuró y procesó los datos meteorológicos y de concentración de contaminantes. Los cálculos de correlación se realizaron en el Instituto de Matemáticas de la Universidad de Bonn. La Sra. Rosa Sibata se encargó del trabajo estenográfico.

BIBLIOGRAFIA

- CHOCK, D. y B. LEVITT, 1976. A space-time correlation Study of Oxidant and Carbon Monoxide in the Los Angeles Basin. *Atm. Environment. Vol. 10*; 107-113.
- HILL, J., 1969. Temperature variability and synoptic cold fronts in the winter climate of Mexico. McGill Univ. Montreal. *Climat. Ser. No. 4*.
- JAUREGUI, E., 1979. Variaciones Espaciales y Temporales del SO₂ en la ciudad de México. Publicaciones de la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente, México.
- KLAUS, D. y E. JAUREGUI, 1979. Análisis Espectral del SO₂ en la ciudad de México y su relación con parámetros meteorológicos. *Geofis. Int. Vol. 18 (3)*; 263-308.
- KLAUS, D., 1973. Las invasiones de aire frío en los trópicos a sotavento de las montañas Rocallosas. *Geofis. Int. Vol. 13 (2)*; 00-143.
- SHIKATA, H. y K. ASAKURA, 1978. Simulating method of multiple source diffusion with correction factors relating to the scale of the source. En WMO Symposium on Boundary Layer Physics Applied to Specific Problems of Air Pollution. Norrköping, Suecia, p. 143-150.
- TURNER, B., 1961. Relationships between 24 hour Mean Air Quality Measurements and Meteorological Factors, *J. Air Poll. Control Ass. Vol. 11(10)* 483-489.
- HOSCHELE, K., 1965. Ergebnisse von Messungen des Schwefeldioxidgehalts der Luft in Karlsruhe und ihre statistische Bearbeitung. *Staub Reinhaltung der Luft. 25(3)*.
- LARSEN, R., 1965. Analysing Air Pollutant Concentration and Dosage Data. *J. Air Poll. Cont. Ass. 15 (12)*.
- KNOX, B. J. and R. LANGE, 1974. Surface Air Pollutant Concentration Frequency Distributions, *J. APCA, 24(1)*, 48-53.